

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 612.001. 573+531.5

В.А. Акулов

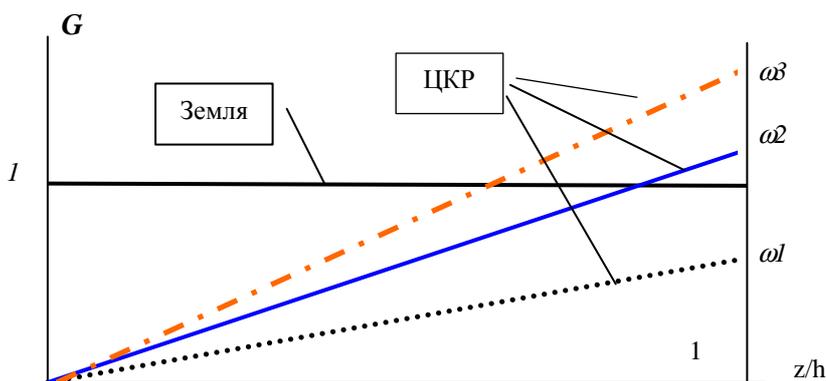
ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ИСКУССТВЕННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ СИЛ ТЯЖЕСТИ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложен системный подход к решению задачи по оценке адекватности искусственной (центрифуга) и естественной силы тяжести (Земля), который трансформировал ее в задачу распознавания ряда эргатических систем. Построена автоматизированная система распознавания человеко-машинных систем на основе алгоритмов обучения и компьютерных программ обработки многомерных данных. Разработаны информационные технологии, ориентированные на обработку экспериментальных данных, полученных на центрифуге и в условиях космических полетов. Выполнена серия вычислительных экспериментов с реальными исходными данными, показавших высокую эффективность предлагаемых подходов.

Разработка эффективных методов борьбы с негативными последствиями длительной невесомости относится к числу актуальных проблем пилотируемой космонавтики [1], [2]. Речь идет о создании искусственной силы тяжести (ИСТ) на борту космических аппаратов, которая бы имитировала действие земной силы тяжести (ЗСТ) на организм человека (ОЧ), пребывающего на поверхности Земли в вертикальной позе [2]. В качестве генератора ИСТ предполагается применить так называемую центрифугу короткого радиуса (ЦКР). В случае реализации этого проекта человек (космонавт) осуществит перемещение из привычной для него среды обитания (поверхность Земли) в искусственно созданную физическую модель (ЦКР). Как оказалось, реализация этой идеи сопряжена с преодолением значительных трудностей, обусловленных, прежде всего, различием в структуре ЗСТ и ИСТ.

Как известно, ЗСТ характеризуется однородностью, под которой понимается постоянство перегрузки G в направлении «голова – ноги» и которая изображается горизонталью (рис. 1, поз. «Земля», $G = \text{Const} = 1$, $0 \leq z/h \leq 1$). Здесь z - продольная координата (направление «голова – ноги»), h - рост испытуемого. В отличие от нее ЦКР генерирует переменную по величине перегрузку. Ее изображением служит пучок прямых, проходящих через начало координат. Соответственно, G возрастает от нуля (ось вращения, $z/h = 0$) до некоторого максимального значения G_{max} ($z/h = 1$), зависящего от угловой скорости вращения ω ($\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$).

Таким образом, ИСТ, создаваемая ЦКР, весьма специфична и характеризуется 100%-ным перепадом G в рабочем диапазоне абсцисс ($0 \leq z/h \leq 1$). Нетрудно заключить, что адекватность ИСТ и ЗСТ в терминах «перегрузки», а в геометрических - «адекватность горизонтали и семейства пучка прямых» является в значительной степени условным (дискуссионным) понятием [2]. Так, например, при вращении ротора ЦКР с частотой ω_1 адекватность отсутствует, так как искусственно созданная перегрузка (ЦКР) не достигает по величине естественной (ЗСТ) во всем диапазоне вариации z/h ($G < 1$, рис. 1). Что касается режимов вращения ω_2 и ω_3 , имеется только по одной точке на оси z/h для каждого из режимов, в которых воспроизводится ЗСТ ($G = 1$). Она определяется как абсцисса точки пересечения соответствующей наклонной (ЦКР) и горизонтали (Земля). В остальных точках ИСТ либо не превышает ЗСТ (область, расположенная левее точки пересечения), либо ее превосходит (правая область). Одним из наиболее простых выходов из указанной неопределенности, который на протяжении ряда лет применяется при исследовании ИСТ, является учет



Р и с. 1. Сравнение распределений искусственной (ЦКР) и естественной сил тяжести (перегрузки G) по безразмерной продольной координате z/h

только максимальной перегрузки G_{max} ($z/h = 1$, уровень стопы ОЧ). Таким образом, при существующем подходе, который можно интерпретировать как точечную и весьма приближенную оценку адекватности, не учитывается такое принципиально важное свойство ЦКР, как распределенность G с весьма значительным по величине перепадом (100%).

Современные информационные технологии (ИТ) позволяют сформулировать и реализовать качественно иную методологию оценки адекватности ИСТ и ЗСТ. Прежде всего, необходимо принять во внимание то обстоятельство, что ИСТ не является самоцелью. Ее главное назначение как физической модели ЗСТ состоит в минимизации отличий жизненно важных параметров ОЧ по отношению к «земным» показателям. Следовательно, при оценке адекватности кроме параметров вращения необходимо учитывать и параметры, характеризующие состояние ОЧ. Выбор таких параметров представляет собой отдельную задачу, некоторые из основных положений которой рассмотрены ниже. Принимая во внимание сложность объекта исследований (человек - механическая система) предлагается *системный подход к решению проблем эффективного противодействия невесомости* и, в частности, к обеспечению адекватности ИСТ и ЗСТ.

С точки зрения ИТ к проблеме оценки адекватности самым тесным образом примыкает комплекс задач по обобщению данных, накопленных авиакосмической медициной и касающихся отклика ОЧ на изменение параметров окружающей среды, под которым понимается вариация величины и направления действия поля тяготения (ПТ: ЗСТ, ИСТ, микрогравитация). Анализу подлежат как минимум пять типов систем «ОЧ – ПТ», которые в результате соответствующей классификации, а также в целях определенности терминологии отнесены к категории эргатических (рис. 2). В итоге *оценка адекватности ИСТ и ЗСТ (поз. 2, 3) переходит в качественно иную категорию и становится составной частью более масштабной задачи, заключающейся в классификации и распознавании сложных человеко-машинных систем (поз. 1-5)*



Р и с. 2. Основные объекты системного анализа и классификации в задачах оценки адекватности ИСТ и ЗСТ. ОДНТ (поз. 5) – один из методов противодействия невесомости и оценки состояния ОЧ (отрицательное давление в нижней части тела)

Цель настоящих исследований состоит в разработке проблемно-ориентированной методики, а также соответствующих процедур классификации и распознавания специфических объектов, связанных с генерацией ИСТ (рис. 2) и построенных на принципах системного анализа.

Задачи исследований

1. Выбор параметров (многомерных векторов состояний), отражающих динамику жизненно важных процессов в ОЧ, доступных для измерения в вышеперечисленных типах систем и обеспечивающих классификацию и распознавание объектов.
2. Построение автоматизированной системы распознавания объектов на основе алгоритмов обучения и компьютерных программ обработки многомерных данных, ориентированной на проблемы адекватности ИСТ и ЗСТ и выполняющей следующие функции:
 - 2.1 автоматизированная классификация объектов;
 - 2.2 автоматизированная оценка непротиворечивости классификации;
 - 2.3 автоматизированное отнесение неизвестного (неклассифицированного) объекта к имеющимся классам с применением обучающих алгоритмов;
 - 2.4 информационное обеспечение экспериментов на ЦКР по оценке эффективности ИСТ с позиций ИТ.
3. Выборочная проверка эффективности предлагаемых технологий на реальной информации (поз. 1, 2).

4. Выдача рекомендаций по направлениям дальнейших исследований.
5. Пропаганда методов многомерного анализа в медицинских кругах.

Методика и основные результаты исследований

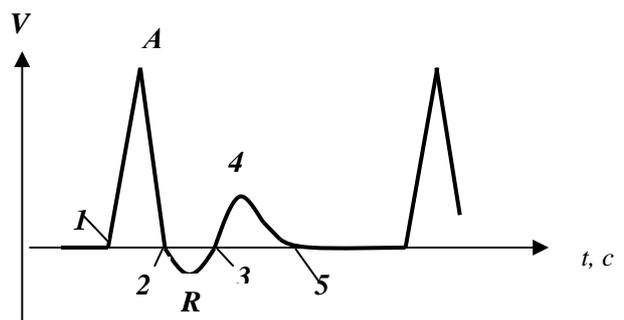
Как известно, к числу первоочередных вопросов многомерного анализа относится выбор информативных признаков, т.е. выбор и обоснование многомерных векторов состояний, наиболее полно отражающих специфику объектов исследований и служащих основой для построения процедур классификации и распознавания [3-5]. Эта проблема в полной мере возникла при разработке настоящей методики, причем она усугубилась отсутствием ближайших аналогов, а также противоречивостью предъявляемых требований. С одной стороны, необходима полнота информации. С другой – доступность широкому кругу медицинских пользователей, а это равносильно максимальному упрощению, снижению размерности векторного пространства до минимально возможных значений. К числу немаловажных требований относится обеспечение четкой медицинской интерпретации результатов и рекомендаций.

Учитывая изложенное, в качестве системообразующего признака (вектора состояний) выбрана пульсовая волна ПВ, представляющая собой изменение мгновенной скорости кровотока в магистральных сосудах конечностей по времени [6]. ПВ обусловлена насосной функцией системы кровообращения, которая, как известно, осуществляется в пульсирующем режиме. На рис. 3 показан один из наиболее распространенных вариантов визуализации ПВ в виде линейной скорости кровотока (ЛСК). ЛСК как параметр ОЧ обладает целым рядом достоинств, четыре из которых являются наиболее существенными в контексте поставленных задач.

- ЛСК активно откликается на изменение величины и направления силы тяжести (внешние возмущения). Об этом свидетельствует как опыт космических полетов («кровь относится к наиболее подвижной материи организма») [2], [7], так и авторский опыт, накопленный в ходе выполнения одномерного анализа (ортопробы) [8-10] и личного участия в экспериментах на ЦКР в качестве испытателя.
- ЛСК как средство описания объектов (человеко-машинных систем) обладает высокой диагностической ценностью [6]. Она характеризует динамику кровообращения, т.е. норму и множество патологий, относящихся к функционированию одной из важнейших систем организма, которая оказывает существенное влияние на состояние других систем. В их числе такие «инерционные» системы, как мягкие ткани и особенно опорно-двигательный аппарат [1, 2].
- Неинвазивность (бескровность) измерений, которая достигается за счет применения методов ультразвуковой доплерографии (УЗДГ) [6].
- Относительная доступность методов УЗДГ в основных сферах пребывания космонавтов, включая центрифуги и космические аппараты (рис. 2).

Осуществив выбор вектора состояний (ЛСК), необходимо обосновать форму его представления (схематизации) в автоматизированной системе распознавания с учетом упоминавшейся противоречивости требований (полнота информации в сочетании с минимальной размерностью векторного пространства). Были рассмотрены следующие варианты схематизации. Первый из них состоит в представлении ЛСК в виде доплеровского спектра. Его главное достоинство – полнота исходных данных для многомерного анализа с перспективой снижения размерности векторного пространства (метод главных компонент (РСА) и т.п.) [3-5]. Однако «извлечение» спектра из применяемой в настоящее время диагностической аппаратуры, особенно портативной (а только она может быть применена в условиях ЦКР и космоса), не представляется возможным по техническим причинам.

Второй из возможных вариантов схематизации заключается в дискретном задании кривой ЛСК с помощью координат (t, V) характерных точек (1, А, 2, R, 3 – 5, рис. 3). Легко видеть, что ординаты точек 1, 2, 3, 5 равны нулю, т.е. в данной ситуации они обладают пониженной информационной ценностью. Основными носителями медицинской информации (диагностика состояний) являются ординаты точек А и R [6]. Первая из них характеризует «пиковое значение антеградной волны» V_{\max}^+ и представляет собой амплитуду скорости пульсовой волны, распространяющейся в прямом направлении, т.е. от сердца к периферии. Ее особую значимость легко показать на следующем примере. Предположим, что точка А в силу некоторых причин, например, внешнего воздействия, оказалась на оси t , что означает отсутствие антеградной



Р и с. 3. Типовая зависимость мгновенной скорости кровотока (V) в бедренной артерии по времени (t) в течение сердечного цикла (схема)

волны ($V_{\max}^+ = 0$). Такая ситуация свидетельствует о возникновении ряда серьезных патологий, таких, как перекрытие просвета сосудов или даже остановка сердца (летальность). Что касается точки R, она характеризует амплитуду отраженной волны V_{\max}^- (ретроградный поток).

Диагностической информацией обладает также ряд функций, аргументами которых служат переменные V_{\max}^+ и V_{\max}^- . К числу важнейших из них относится индекс периферического сопротивления (ИС), который вычисляется по формуле [6]:

$$ИС = [(V_{\max}^+) - (V_{\max}^-)] / (V_{\max}^+). \quad (1)$$

Таким образом, в результате схематизации пульсовой волны по второму варианту формируется 3-мерное векторное пространство в координатах V_{\max}^+ , V_{\max}^- , ИС, что существенно проще, чем в первом варианте.

Прежде чем сформулировать третий вариант схематизации, рассмотрим результаты одномерного анализа ЛСК. Как показали критерии Вилкоксона и знаков, наиболее существенным откликом на внешние возмущения обладает V_{\max}^+ бедренной артерии [10]. В противоположность этому отклик ИС оказался статистически незначимым. Такая ситуация вполне возможна в случае значительной корреляции между V_{\max}^+ и V_{\max}^- . В качестве одного из подтверждений сошлемся на формулу (2), которая является вариантом (1) и которой, по крайней мере, не противоречит выдвинутое предположение (см. подробную часть):

$$ИС = 1 - V_{\max}^- / V_{\max}^+. \quad (2)$$

Другим подтверждением служит коэффициент корреляции. Как показали авторские расчеты, в среднем его величина равна 0,7, что свидетельствует о преобладании детерминированной закономерности, определяющей параметры пульсовой волны.

С учетом изложенного нами сформулирован третий вариант схематизации – построение аппроксимационной модели волны, который далее принят в качестве основного. Как следует из рис. 3, ЛСК представляет собой двухфазный процесс. Первая фаза характеризуется линейным ростом V от нулевого значения (точка 1) до V_{\max}^+ (точка А). Вторая фаза начинается в точке А, заканчивается в точке B и является затухающим периодическим процессом («выбег»). Как указывалось, большой диагностической ценностью обладает точка R, отражающая свойства обратной волны. В связи с этим к модели было предъявлено требование совпадения расчетных и экспериментальных данных в точках А и R. В итоге в качестве аппроксимационной модели предложена двухфазная функция вида

$$V = \begin{cases} Bt/t_1, & 0 \leq t < t_1, \quad (\text{Фаза 1, прямая линия}); \\ B e^{-\alpha(t-t_1)} \text{Cos}(\omega(t-t_1)), & t_1 \leq t < T_c. \quad (\text{Фаза 2, "выбег"}). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $B = V_{\max}^+$; t – текущее время; t_1 – абсцисса (время) точки А; α – коэффициент затухания; ω – круговая частота затухающих колебаний ПВ; T_c – период сердечных сокращений.

Как следует из формулы (3), аппроксимация формирует трехмерное векторное пространство в системе координат V (V_{\max}^+), α , ω . В целях сокращения изложения формулы для расчета компонентов векторного пространства не приводим. В качестве иллюстрации рассмотрим модель ПВ, рассчитанную при следующих исходных данных (координатах точек А и R): А(0,14с; 0,64 м/с), R(0,26 с, -0,16 м/с), характерных для объекта 1 (рис. 2).

$$V = \begin{cases} 0,64t/0,14, & 0 \leq t < 0,14 \text{ с}, \\ 0,64 e^{-11,6(t-0,14)} \text{Cos}(26,17(t-0,14)), & 0,14 \text{ с} \leq t < 0,9 \text{ с}. \end{cases} \quad (4)$$

Модельная ПВ, соответствующая формуле (4), приведена на рис. 4. Как видно, принятая модель воспроизводит как форму ПВ, так и параметры диагностически значимых точек (см. исходные данные). Таким образом, исследуемый объект описывается трехмерным вектором вида

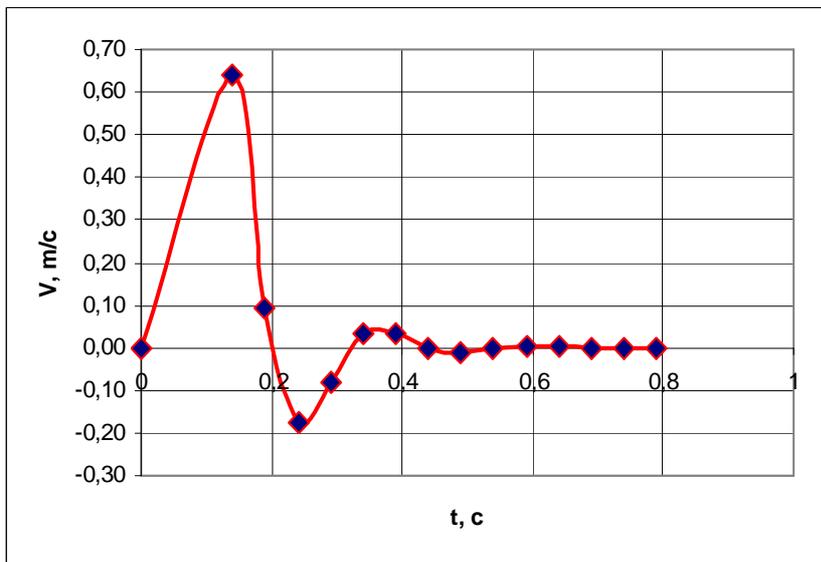
$$\overline{ПВ}_1 = (0,64; 11,6; 26,17). \quad (5)$$

Для сравнения приведем компоненты вектора состояний, рассчитанные при исходных данных А(0,12 с; 0,33 м/с), R (0,27 с; -0,08 м/с), характерных для объекта 2 (рис. 2):

$$\overline{PB}_2 = (0,33; 9,45; 20,93). \quad (6)$$

Отметим ряд важных с практической точки зрения результатов. Во-первых, сложный переходный процесс, каковым является пульсовая волна, моделируется вектором небольшой размерности (B, ω, α) . Это позволяет реализовать модель в популярной среде Excel и обеспечить технологию вычислительного эксперимента широкому кругу медицинских пользователей.

Во-вторых, модель пульсовой волны в форме (3), т.е. в трехмерном пространстве, предоставляет широкие возможности для осуществления многомерного анализа (классификация, распознавание объектов и т.п.). В-третьих, вариация внешних факторов (поворот вектора силы тяжести на угол $\pi/2$) сопровождается откликом параметров модели и, прежде всего откликом величины B (см. векторы (5), (6)). V_{\max}^+ играет основную роль в модели нестационарного компонента кровообращения. В частности, если известны величины ω, α , которые, как следует из приведенных примеров, зависят от объектов моделирования, достаточно задать лишь величину V_{\max}^+ , чтобы восстановить всю модельную кривую. Это свойство пульсовой волны позволяет снизить размерность векторного пространства (в первом приближении) вплоть до единицы и выполнять анализ в псевдомногомерном пространстве. Подобная декомпозиция весьма важна с практической точки зрения: она существенно упрощает технологию экспериментов, снижая их стоимость, что важно в условиях ЦКР и космоса. В-четвертых, относительная простота модели (3) свидетельствует о перспективности исследований, выполняемых рядом коллективов, по созданию пульсирующей модели системы кровообращения, основанной на ее схематизации и учете работы систем регуляции.



Р и с. 4. Пример модели пульсовой волны

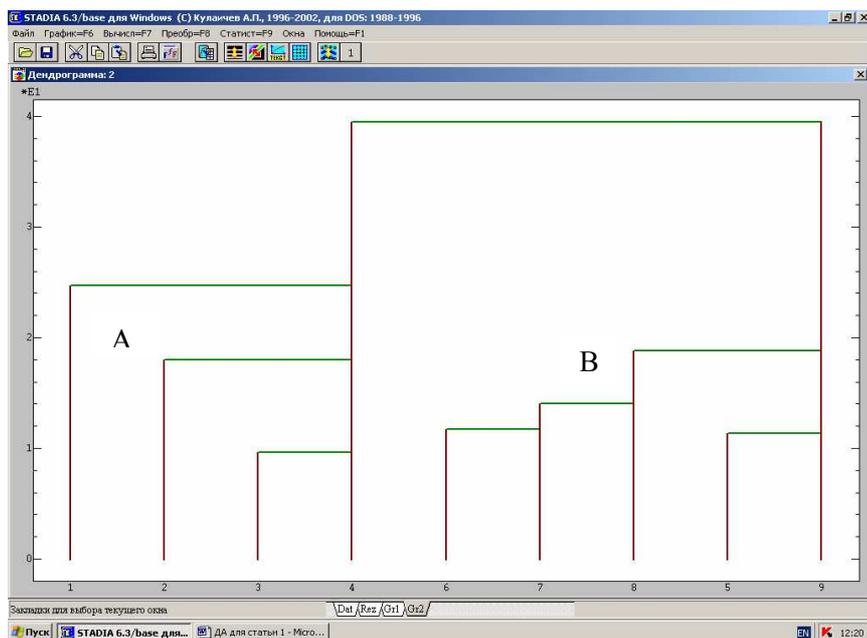
Построение автоматизированной системы распознавания человеко-машинных объектов

В соответствии с поставленными задачами (пункт 2) следующий этап исследований состоял в построении автоматизированной системы распознавания объектов. Как известно, подобного класса задачи решаются методами многомерного анализа, который предоставляет «вычислительные и графические средства для исследования различных форм ассоциаций (сходства, близости, группировки данных)» [4]. В соответствии с теоретическими положениями исходные данные следует представить «в виде множества переменных, значения которых измерены у некоторого числа объектов, наблюдений или измерений. При этом все переменные рассматриваются как равноправные» [4]. С учетом общетеоретических положений, а также специфики объектов исследования, разработана система классификации и распознавания, основанная на следующих принципах и положениях.

- А) исходными данными служат множества значений V_{\max}^+ , измеренных при испытаниях эргатических систем, представленных на рис. 2;
- В) подготовка исходных данных к анализу заключается в формировании «псевдомногомерного» пространства параметра V_{\max}^+ размерности ≥ 5 , что обусловлено следующими теоретическими положениями. Корректное выполнение кластерного и дискриминантного анализа требует не менее 4-х представителей каждой из систем [4]. В свою очередь, критерий χ^2 , который используется в дискриминантном анализе, оперирует выборками объема не менее 20 единиц. Таким образом, по каждому из объектов распознавания и классификации следует сформировать матрицу размерности не менее, чем 4×5 ;
- С) классификация объектов (эргатических систем) выполняется с помощью кластерного анализа на основе стратегии «ближнего соседа»;
- Д) непротиворечивость классификации оценивается методами дискриминантного анализа;
- Е) задача по отнесению неизвестного (нового) объекта к одному из рассматриваемых классов решается методами дискриминантного анализа с привлечением обучающих алгоритмов;
- Ф) в качестве инструментального средства применяется профессиональная программная среда Stadia 6.0 [4].

Отладка и тестирование системы распознавания осуществлялись на реальных исходных данных, полученных в результате выполнения ортопроб. Ортопробы представляют собой эксперимент по переходу человека из горизонтального положения (клиностастика, поз. 1, рис. 2) в вертикальное (ортостаз, поз. 2). С точки зрения системного анализа цель ортопроб – оценка значимости отклика исследуемых объектов на изменение направления действия силы тяжести.

В первом случае (клиностастика) оно ортогонально по отношению к продольной оси человека, а во втором – коллинеарно. Проиллюстрируем результаты тестирования. На рис. 5 показан типовой пример дендрограммы, полученной в результате кластерного анализа. Объекты №1-4 представляли систему «клиностастика» (рис. 2, поз. 1), а объекты №5-8 – ортостаз, т.е. заведомо другую систему (поз. 2). Цель тестирования состояла в оценке эффективности кластерного анализа по осуществлению классификации (безошибочности) на основе предложенного псевдомногомерного векторного пространства как наиболее простого варианта схематизации пульсовой волны.



Р и с. 5. Результаты кластерного анализа (типовая дендрограмма).
По оси абсцисс отложены номера объектов, по оси ординат – евклидовы расстояния

на два класса (области А и В), причем объекты безошибочно отнесены именно к тому классу, из которого они были извлечены для тестирования. В ходе тестирования была выполнена серия кластерных анализов, и во всех без исключения случаях осуществлялась безошибочная классификация.

В соответствии с заявленной концепцией (пункты D, E) следующим этапом исследований стал дискриминантный анализ. Исходными данными для него послужили те же псевдомногомерные пространства, что и для кластерного анализа. Как показала серия расчетов, в случае анализа с привлечением обучающих алгоритмов обеспечивается уверенное распознавание неклассифицированных объектов и их отнесение к соответствующему кластеру. Кроме того, подтверждена непротиворечивость классификации, выполненной методами кластерного анализа с привлечением стратегии ближайшего соседа. Иллюстрацией изложенного служит таблица.

Как видно, кластерный анализ осуществил распределение объектов

Результаты дискриминантного анализа ЛСК при ортостатических пробах (фрагмент)

Расстояние Махаланобиса = 1032, значимость ≈ 0						
Коэффициенты дискриминантной функции						
Класс	a[0]	a[1]	a[2]	a[3]	a[4]	a[5]
1	-8410	32.3	184.3	-41.18	81.6	70.01
2	-4230	22.36	132.9	-29.08	56.91	48.46

Что касается информационного обеспечения экспериментов на ЦКР (пункт 2.4), ситуация состоит в следующем. Количественные данные о параметрах пульсовой волны в условиях ИСТ отсутствуют, так как УЗДГ на ЦКР не производилась. Отсутствие информации о функционировании системы кровообращения, являющейся особо важной в жизнеобеспечении человека, создает неопределенную ситуацию, касающуюся оценки эффективности ИСТ как профилактического средства. В связи с этим формируются два направления исследований. Одно из них - подготовка и осуществление серии экспериментов с измерением параметров ЛСК, другое - обработка и анализ информации. Указанные направления тесно взаимосвязаны, и только в случае их реализации появятся объективные данные для оценки адекватности ИСТ и ЕСТ в части нестационарного компонента системы кровообращения (пульсовой волны).

Основная проблема, затрудняющая осуществление первого направления, состоит в отсутствии технической возможности применения общепринятых методик и схем УЗДГ в условиях мало-

габаритных вращающихся платформ. Это относится и к стационарному оборудованию, оснащеному разветвленным сервисом, и к общепринятой парной схеме обследования «врач – пациент». Определенные затруднения привносят такие факторы, как действие значительных по величине центробежных и кориолисовых сил, а также отсутствие ближайших аналогов. Несмотря на эти сложности, нами разработана программа и технология экспериментов на ЦКР, которая находится в стадии реализации. Что касается процедур обработки и анализа данных, они предусмотрены в вышеприведенной автоматизированной системе распознавания объектов. Анализу подлежат, прежде всего, три объекта (поз. 1, 2, 3, рис. 2), где объекты 1 и 2 классифицированы (примеры приведены на рис. 5 и в таблице), причем «2» является объектом имитации. ЦКР при этом рассматривается как объект, подлежащий классификации. С научно-практической точки зрения представляют интерес три возможных исхода распознавания. Первый, наиболее благоприятный: ЦКР принадлежит к классу «2», что означает обеспечение адекватности (в статистическом смысле). Вторым вариантом: ЦКР принадлежит к классу «1», который по своим свойствам близок к классу «4» (невесомость). Наконец, третий исход состоит в том, что ЦКР (пульсовая волна) образует новый класс. Особо подчеркнем, что при втором и третьем вариантах исходов потребуется значительный объем работ по медицинской оценке имеющихся отличий, а также поиску оптимальных циклограмм вращения. В то же время на основании выполненных исследований [10] весьма обнадеживающим фактором является то, что вопрос обеспечения адекватности по статическому компоненту (восстановление уровня давления в артериях, потерянного в результате невесомости) практически решен [8], [9]. Разработаны алгоритмы и программы, которые позволяют рассчитать режимы вращения, обеспечивающие как минимально возможные отличия от естественных распределений давления крови вдоль продольной оси человека (oz), так и любые уровни рассогласования, назначенные экспериментаторами.

Заключение

Оценка адекватности модельной силы тяжести (центрифуга) по отношению к земной является задачей, с одной стороны, ориентированной на перспективу космонавтики, а с другой - находящейся в стадии широкомасштабных исследований. Как вариант ее решения нами предлагается системный подход. При этом формируются пять эргатических систем. В результате задача оценки адекватности ИСТ и ЕСТ переходит в категорию задач оценки «различий между двумя и более группами объектов по нескольким переменным», что, как известно, относится к предметной области дискриминантного анализа [6]. В качестве выходного параметра выбрано пиковое значение антеградного потока в бедренной артерии, характеризующего динамическую составляющую кровотока (ЛСК), обусловленную насосной функцией сердца. Обоснованность выбора подтверждена корреляционным анализом и математическим моделированием пульсовой волны (1-3).

Предложены информационные технологии и соответствующие процедуры, ориентированные на решение задачи «динамической» адекватности. Построена система распознавания объектов, основанная на принципах геометрической близости (евклидова метрика и расстояние Махаланобиса). Выполнена ее отладка и апробация на реальной информации, полученной в ходе специальных экспериментов (ортостатические пробы – переход из положения «лежа» в положение «стоя»). Показано, что в случае применения режимов обучения дискриминантный анализ обеспечивает уверенное распознавание объектов. С научной и практической точек зрения важны три основных обстоятельства. Во-первых, полученные результаты, относящиеся к системам «человек (клиностати́ка) – Земля» и «человек (ортостаз) – Земля», находятся в полном соответствии с результатами медицинских исследований, дополняя друг друга. Во-вторых, разработана информационная технология, ориентированная на расчетно-экспериментальное исследование пульсовой волны и основанная на математической модели (1-3). С целью обеспечения доступности технологии широкому кругу пользователей модель реализована в среде Excel. В-третьих, выполнена информационная подготовка к осуществлению уникального эксперимента по измерению нестационарного кровотока в условиях искусственной силы тяжести и, главное, объективной оценки его адекватности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газенко О.Г., Григорьев А. И., Егоров А. Д. От 108 минут до 438 суток и далее... (к 40-летию полета Ю.А. Гагарина) // Авиакосм. и эколог. мед. 2001. Т. 35. №2. С. 10-11.
2. А.Р. Котовская, А.А. Шипов, И.Ф. Виль-Вильямс. Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. М: Слово, 1986. С. 203.
3. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М: Мир, 1978. С 411.
4. А.П. Кулаичев. Методы и средства анализа данных в среде Windows STADIA 6.0. М: НПО «Информатика и компьютеры», 1996. 255 с.
5. Эмбенсен К. Анализ многомерных данных (избранные главы): Пер. с англ. Самара: СамГТУ, 2005. С. 158.
6. Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. Основные принципы гемодинамики и ультразвуковое исследование сосудов // Клиническое руководство по ультразвуковой диагностике / Под. ред. В.В. Митькова; М: Видар, 1997. Т. IV. С 185-194.
7. А. Ю. Модин, В.С. Шашков. Влияние гравитации на линейную скорость кровотока в артериальном русле здорового человека // Авиакосм. и эколог. мед., 2002. Т. 36. №4. С. 26-29.
8. В.А. Акулов. Гравитационная терапия: четыре аспекта моделирования гемодинамики конечностей // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2004. №1 (5). С. 61-67.
9. В.А. Акулов Биомеханический критерий адекватности модельной и естественной силы тяжести // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2005. №1.
10. В.А. Акулов. Стохастическая модель отклика системы кровообращения на внешние возмущения // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2005. №38. С. 72-77.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2006 г.

УДК 681.51, 629.78

С.А. Бутырин

СИНТЕЗ МАРШРУТНОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКЕ ЗЕМЛИ С ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНИИ*

Описывается метод синтеза углового движения космического аппарата при съемке Земли из космоса при движении следа центральной линии визирования орбитального телескопа по геодезической линии и при постоянной ориентации в орбитальной системе координат.

В дополнении к результатам [1] рассматриваются задачи расчета программного углового движения космического аппарата (КА) оптико-электронной съемки Земли при движении следа линии визирования (ЛВ) орбитального телескопа (ОТ) на поверхности Земли по геодезической линии и при постоянной ориентации ЛВ в орбитальной системе координат. Приводятся также результаты численного моделирования расчета маршрутов по предлагаемым алгоритмам и оценки погрешностей.

Для решения задачи вводятся следующие правые ортогональные системы координат (СК): *инерциальная экваториальная СК* (ИСК) $O_{\oplus}x^1y^1z^1$ эпохи T , имеющая начало в центре масс O_{\oplus} Земли: ось $O_{\oplus}x^1$ направлена в среднюю точку весеннего равноденствия эпохи T , а ось $O_{\oplus}z^1$ направлена по нормали к плоскости экватора в сторону Северного полюса мира; *гринвичская СК* (ГСК) $O_{\oplus}x^g y^g z^g$, связанная с эллипсоидальной, вращающейся в ИСК относительно оси $O_{\oplus}z^1(O_{\oplus}z^g)$ моделью Земли [2]; *орбитальная СК* (ОСК) $O_c x^o y^o z^o$, имеющая начало в центре масс КА O_c , ось $O_c y^o$ которой направлена по радиали орбиты, а ось $O_c z^o$ - по отрицательному направлению нормали орбиты; *горизонтная СК* (ГорСК) $O_p x^h y^h z^h$, имеющая начало в точке P на поверхности Земли: ось $O_p x^h$ направлена по орту внешней нормали к поверхности эллипсоида в точке P ; ось $O_p z^h$ - по касательной к геодезическому меридиану точки G на север, а ось $O_p y^h$ - на местный восток; *маршрутная СК* $O_p x^m y^m z^m$ получается из ГорСК разворотом последней на угол $\pi/2 - A$ вокруг оси $O_p x^h$, где A - текущий азимут маршрута съемки; *визирная СК* (ВСК) $O_s X^v Y^v Z^v$, связанная с корпусом КА, началом в центре проектирования S и визирной осью $O_s x^v$, направленной по оптической оси ОТ в сторону наблюдаемого объекта. Для простоты принимается, что центр масс КА (C) и центр проектирования (S) совпадают. Начало координат фокальной плоскости (ФП) ОТ O_f , в которой расположены оптико-электронные преобразователи, сдвинуто от начала ВСК в отрицательном на-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 04-01-96501-а)

правлении оси $O_s x^v$ на величину фокусного расстояния ОТ F, ее оси $O_f y^f, O_s z^s$ совпадают по направлению с одноименными осями ВСК.

Поверхность Земли описывается в виде сжатого в направлении ее полюсов эллипсоида вращения с полуосями a_e, c_e (референс-эллипсоида Красовского). Положение точки P на земной поверхности может определяться как декартовыми координатами x_p^g, y_p^g, z_p^g , так и эллипсоидальными геодезическими координатами: широтой B_p , долготой L_p и высотой H_p .

Расчет маршрута съемки по геодезической линии

Маршрут съемки задается двумя точками на земной поверхности: начальной, с геодезическими координатами – широтой B_0 и долготой L_0 , и конечной – с координатами B_k, L_k . След ЛВ при съемке движется по геодезической линии – линии пересечения эллипсоида плоскостью, проходящей через эти точки и центр Земли.

Угловое движение КА определяется кватернионом ориентации ВСК относительно ИСК $\Lambda_I^v = \Lambda = \{\lambda_0, \lambda\}$, $\lambda = \{\lambda_i, i = 1:3\}$, получаемым из решения дифференциального кинематического уравнения

$$\dot{\Lambda}(t) = \frac{1}{2} \Lambda(t) \circ \omega(t) \quad (1)$$

при известном векторе абсолютной угловой скорости $\omega = \omega^v = \omega^v(t) = \{\omega_i^v(t), i = 1:3\}$, заданной в разложении на оси ВСК с начальным условием $\Lambda(t_0)$.

Компоненты угловой скорости движения КА относительно ГСК ω_y, ω_z вычисляются из требований, согласно которым в центре ФП O_f продольная скорость движения изображения V_y (направленная вдоль оси $O_f y^f$) должна иметь требуемую величину V_f , а поперечная V_z (вдоль оси $O_f z^f$) – быть равной нулю:

$$\begin{bmatrix} \omega_y^v(t) \\ \omega_z^v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{s3} \\ -\tilde{v}_{s2}(t) - \tilde{W}_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\tilde{W}_y = V_f / F$ – требуемая нормированная к фокусному расстоянию F скорость бега изображения в фокальной плоскости ОТ, а $\tilde{v}_s = \tilde{v}_s(t)$ – нормированная к наклонной дальности D линейная скорость движения ЦМ КА относительно ГСК в проекции на оси ВСК:

$$\tilde{v}_s(t) = \{v_{si}, i = 1:3\} = [\tilde{\Lambda}_I^v(t) \circ (\mathbf{V}_s^I(t) - \omega_e \times \mathbf{R}_s^I(t)) \circ \Lambda_I^v(t)] / D(t), \quad (3)$$

где $\omega_e = \{0; 0; \omega_e\}$ – вектор угловой скорости вращения Земли в ГСК, $\mathbf{R}_s^I(t), \mathbf{V}_s^I(t)$ – координаты и скорости движения центра масс КА в ИСК, $D = |\mathbf{D}^I(t)|$ – величина вектора наклонной дальности, направленного по визирной оси из центра проектирования S в наблюдаемую точку земной поверхности P.

Методика определения компоненты ω_x^v (направленной по визирной оси) основана на численном дифференцировании кватерниона ориентации ВСК относительно ИСК.

Пусть $\Lambda(t_0)$ – кватернион ориентации КА (ВСК относительно ИСК) в некоторый момент времени t, причем ЛВ пересекает поверхность Земли в начальной точке геодезической линии с координатами $B_0 = B_0(t_0), L_0 = L_0(t_0)$, и по истечении малого промежутка времени Δt также известно требуемое (программное) значение кватерниона ориентации КА $\Lambda_p(t + \Delta t)$ при условии, что точка пересечения ЛВ с земной поверхностью принадлежит геодезической линии.

Тогда из кинематического уравнения (1) имеем

$$\omega(t) = 2\tilde{\Lambda}(t) \circ \dot{\Lambda}(t), \quad (4)$$

или приближенно

$$\omega(t) \approx 2\tilde{\Lambda}(t) \circ \Delta\Lambda(t) / \Delta t, \quad \Delta\Lambda(t) = \Lambda_p(t + \Delta t) - \Lambda(t). \quad (5)$$

Выражение для определения ω_x^v следует из развернутой записи формулы (5)

$$\omega_x^v(t) = 2(\lambda_0(t)\Delta\lambda_1(t) - \lambda_1\Delta\lambda_0 - \lambda_2\Delta\lambda_3 + \lambda_3\Delta\lambda_2) / \Delta t. \quad (6)$$

Кватернион $\Lambda_p(t + \Delta t)$ определяется по алгоритму S.W. Stanley как функция от матрицы $\mathbf{M}_p = \mathbf{M}_I^v(t + \Delta t)$

$$\Lambda_p(t + \Delta t) = f_s(\mathbf{M}_p), \quad (7)$$

которая составляется из ортов-столбцов осей ВСК в ИСК в виде

$$\mathbf{M}_p = [\mathbf{e}_x^I \mid \mathbf{e}_z^I \times \mathbf{e}_x^I \mid \mathbf{e}_z^I]^T, \quad (8)$$

где \mathbf{e}_x^I - орт визирной оси в ИСК; \mathbf{e}_z^I - орт линейки ОЭП (оси Oz ВСК) в ИСК. Орт \mathbf{e}_z^I определяется как перпендикуляр одновременно визирной оси и оси Oy^m маршрутной СК, т.е.

$$\mathbf{e}_z^I = (\mathbf{e}_{ym}^I \times \mathbf{e}_x^I) / |\mathbf{e}_{ym}^I \times \mathbf{e}_x^I|. \quad (9)$$

Здесь \mathbf{e}_{ym}^I - орт оси Oy^m маршрутной СК в ИСК:

$$\mathbf{e}_{ym}^I = \mathbf{N}_m^I \times \mathbf{e}_r^I, \quad (10)$$

\mathbf{N}_m^I - орт нормали к плоскости геодезической линии, \mathbf{e}_r^I - орт вектора, направленного из центра Земли в точку на маршруте съемки. Орт нормали

$$\mathbf{N}_m^I = (\mathbf{e}_{r0}^I \times \mathbf{e}_{rk}^I) / |\mathbf{e}_{r0}^I \times \mathbf{e}_{rk}^I|, \quad (11)$$

где $\mathbf{e}_{r0}^I \times \mathbf{e}_{rk}^I$ - векторы, направленные из центра Земли в начальную и конечную точки на маршруте съемки.

Если определить начальный кватернион $\Lambda(t_0)$ по соотношениям (7)-(9), то при значениях угловой скорости вида (2) и произвольной проекции угловой скорости на визирную ось точка пересечения ЛВ с земной поверхностью будет двигаться по касательной к геодезической линии.

Используя этот факт, можно определить вектор угловой скорости КА относительно ИСК в виде

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \{0; \omega_y^v; \omega_z^v\} + \{\omega_{ey}^v; \omega_{ez}^v\}; \quad \boldsymbol{\omega}_e^v = \{\omega_{ex}^v; \omega_{ey}^v; \omega_{ez}^v\} = \tilde{\Lambda}_I^v(t) \circ \boldsymbol{\omega}_e \circ \Lambda_I^v(t), \quad \boldsymbol{\omega}_e = \{0; 0; \omega_e\}. \quad (12)$$

Считая на малом промежутке времени $[t, t + \Delta t]$ угловую скорость КА приближенно постоянной, для момента времени $t + \Delta t$ определяются положение ЦМ

$$\mathbf{R}_s^I(t + \Delta t) = \mathbf{R}_s^I(t) + \mathbf{V}_s^I(t)\Delta t \quad (13)$$

и кватернион ориентации КА

$$\Lambda(t + \Delta t) = \Lambda(t) \circ [\cos(|\tilde{\boldsymbol{\omega}}| \Delta t / 2), \mathbf{e} \cdot \sin(|\tilde{\boldsymbol{\omega}}| \Delta t / 2)], \quad \mathbf{e} = \tilde{\boldsymbol{\omega}} / |\tilde{\boldsymbol{\omega}}|. \quad (14)$$

По известным $\mathbf{R}_s^I(t + \Delta t)$ и $\Lambda(t + \Delta t)$, используя соотношения, приведенные в [1], определяется радиус-вектор $\mathbf{R}_{om}^I(t + \Delta t)$, направленный из центра Земли в новую точку пересечения ЛВ с поверхностью Земли, и вектор наклонной дальности $\mathbf{D}^I(t + \Delta t)$. Далее по формулам (7)-(10) определяется новое значение программного кватерниона ориентации $\Lambda_p(t + \Delta t)$, а по формуле (6) - значение проекции вектора угловой скорости КА на визирную ось. После этого окончательно формируется вектор угловой скорости КА

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \{\omega_x^v; \omega_y^v; \omega_z^v\} + \{0; \omega_{ey}^v; \omega_{ez}^v\}. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (1) при начальных условиях $\Lambda(t_0), \boldsymbol{\omega}(t_0)$ с определением угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ на каждом шаге интегрирования, по соотношениям (6)-(15) получим программное движение КА $\Lambda(t), \boldsymbol{\omega}(t), t \in [0, T]$ при съемке маршрута по геодезической линии. Момент времени окончания интегрирования определяется условием прохождения линией маршрута траверса заданной конечной точки. Шаг численного дифференцирования Δt является экспериментально подбираемой константой и не связан с шагом интегрирования дифференциального уравнения (1).

Алгоритм имеет методические погрешности, связанные с неточностью численного дифференцирования (6), которые будут приводить к отклонению расчетного маршрута от заданной геодезической линии. Численные расчеты показывают, что для маршрутов с угловой длиной 1° дуги геодезической линии (111 км на местности) погрешности метода не превышают 1 метра. При удалении от трассы точек маршрута, соответствующих углам отклонения визирной оси от надира до 60° , погрешности увеличиваются, но не превышают нескольких десятков метров, что вполне достаточно для практического применения метода.

Расчет маршрута съемки с постоянной ориентацией визирной оси в ОСК

При этом методе съемки траектория следа центральной ЛВ по поверхности Земли проходит на некотором расстоянии от трассы, величина которого при заданной ориентации ЛВ в ОСК зависит от высоты полета. Ориентация ЛВ в ОСК задается двумя углами, причем первый поворот выполняется на угол α вокруг оси Oz ВСК (ОСК), второй – на угол β вокруг нового положения оси Oy ВСК.

Угловое движение КА определяется кватернионом ориентации ВСК относительно ИСК $\Lambda(t)$ и вектором абсолютной угловой скорости $\omega = \omega^v(t)$, заданной в разложении на оси ВСК для произвольного момента времени t .

Кватернион ориентации ВСК относительно ИСК равен величине

$$\Lambda_1^v(t) = \Lambda_1^o(t) \circ \Lambda_o^v(t_0), \quad (16)$$

где $\Lambda_1^o(t), \Lambda_o^v(t)$ - кватернионы ориентации ИСК относительно ОСК и ОСК относительно ВСК соответственно.

Кватернион Λ_o^v определим через кватернион $\Lambda_{o/\psi=0}^v(t)$ при нулевом угле ψ поворота вокруг визирной оси и кватернион поворота вокруг визирной оси $\Lambda_\psi = \{\cos(\psi/2); \mathbf{e}_\psi \sin(\psi/2)\}$, $\mathbf{e}_\psi = \{1; 0; 0\}$,

$$\Lambda_o^v(t) = \Lambda_{o/\psi=0}^v(t) \circ \Lambda_\psi. \quad (17)$$

Кватернион $\Lambda_{o/\psi=0}^v(t)$ определяется углами ориентации ЛВ в ОСК α и β в виде

$$\Lambda_o^v(t) = \{c_\alpha c_\beta; c_\alpha s_\beta; s_\alpha s_\beta; s_\alpha c_\beta\}; \quad c_\varphi = \cos(\varphi/2), s_\varphi = \sin(\varphi/2), \varphi = \alpha, \beta, \quad (18)$$

а кватернион $\Lambda_1^o(t) = f_s(\mathbf{M}_1^o)$ перехода из ИСК в ОСК как функция f_s по алгоритму S.W. Stanley от матрицы \mathbf{M}_1^o , составленной из ортов столбцов и зависящей от параметров движения центра масс КА $\mathbf{R}_s^I(t), \mathbf{V}_s^I(t)$

$$\mathbf{M}_1^o(t) = [\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_3 \quad | \quad \mathbf{e}_1 \quad | \quad \mathbf{e}_3], \quad (19)$$

где $\mathbf{e}_1 = \mathbf{R}_s^I(t), \mathbf{V}_s^I(t)$; $\mathbf{e}_3 = (\mathbf{V}_s^I(t) \times \mathbf{R}_s^I(t)) / |\mathbf{V}_s^I(t) \times \mathbf{R}_s^I(t)|$.

Из условия неизменной ориентации ЛВ в ОСК следует равенство угловой скорости КА в проекции на оси Oz и Oy ВСК соответствующим проекциям орбитальной угловой скорости КА ω_o^I на эти оси. Спроектируем ω_o^I на оси ВСК

$$\omega_*^v(t) = \{\omega_*^v; \omega_y^v; \omega_z^v\} = \tilde{\Lambda}_1^v(t) \circ \omega_o^I \circ \Lambda_1^v(t). \quad (20)$$

Искомый вектор угловой скорости КА $\omega^v(t)$ будет включать ω_y^v и ω_z^v из (19), а проекция угловой скорости КА на визирную ось ω_x^v определяется из условия, что вектор скорости движения изображения (СДИ) в центре фокальной плоскости ОТ должен быть перпендикулярен линейке ОЭП, т.е. оси Oz ВСК.

Угол поворота ψ равен

$$\psi(t) = \begin{cases} -\arctg(V_{\Sigma z}^v(t)/V_{\Sigma y}^v(t)), & V_{\Sigma y}^v \neq 0, \\ \pi \cdot \text{sign}(V_{\Sigma z}^v(t))/2, & V_{\Sigma y}^v = 0, \end{cases} \quad (21)$$

где $\mathbf{V}_\Sigma^v(t)$ - вектор линейной скорости точки следа ЛВ относительно поверхности Земли в проекции на оси ВСК, равный величине

$$\mathbf{V}_\Sigma^v(t) = \{V_{\Sigma x}^v(t); V_{\Sigma y}^v(t); V_{\Sigma z}^v(t)\} = \tilde{\Lambda}_{I/\psi=0}^v(t) \circ (\mathbf{V}_e^I(t) - \mathbf{V}_s^I(t)) \circ \Lambda_{I/\psi=0}^v(t) + \mathbf{V}_\omega^v(t), \quad (22)$$

где кватернион $\Lambda_{I/\psi=0}^v$ определяется по формулам (16)-(19) при $\psi=0$, а векторы $\mathbf{V}_e^I, \mathbf{V}_\omega^v$ - по формулам

$$\mathbf{V}_\omega^v(t) = \mathbf{D}^v(t) \times \omega_*^v(t); \quad (23)$$

$$\mathbf{V}_e^I(t) = \omega_e \times \mathbf{R}_p^I(t); \quad (24)$$

$$\mathbf{D}^v(t) = \tilde{\Lambda}_{I/\psi=0}^v(t) \circ \mathbf{D}^I(t) \circ \Lambda_{I/\psi=0}^v(t), \quad (25)$$

в которых обозначено: $\omega_e = \{0; 0; \omega_e\}$ - вектор угловой скорости вращения Земли в ИСК; R_p^I - вектор, направленный из центра Земли в наблюдаемую точку (p) в ИСК; $D^I(t) = R_p(t) - R_s(t)$ - вектор наклонной дальности в ИСК.

Соотношения (16) – (25) позволяют для каждого дискретного момента времени $t_i, i = 0: N$ из интервала времени съемки маршрута $[0, T], T = \Delta t \cdot (N - 1)$, где Δt - шаг расчета по времени, последовательно определить угол $\psi(t)$, кватернион $\Lambda_1^v(t)$ и угловые скорости $\omega_y^v(t)$ и $\omega_z^v(t)$.

Угловая скорость по визирной оси определяется численно из условия, что на малом интервале времени Δt ее можно считать постоянной

$$\omega_1(t_{i-1}) = (\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})) / \Delta t, \quad i = 1: N. \quad (26)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутырин С.А. Синтез маршрута космического аппарата наблюдения Земли с выравниванием продольной составляющей скорости движения изображения // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. Самара: СамГТУ, 2005. Вып. 37. С. 128-134.
2. Баранов В.Н., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия. М.: Недра, 1986. 407 с.

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2006 г.

УДК 621.6-52 + 665.723

И.А. Данилушкин, М.В. Лежнев

СТРУКТУРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВСТРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОТОКОВ*

Для противоточного теплообменника, представленного в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, методами структурной теории распределенных систем получены передаточные функции, описывающие влияние входов теплообменника на выходы. Противоточный теплообменник рассматривается как базовая модель для описания процессов теплопереноса и массопереноса, протекающих в ряде аппаратов технологической установки абсорбционной осушки газа с помощью регенерируемого раствора абсорбера. Модель разрабатывается для последующей параметрической идентификации на базе пассивного эксперимента и синтеза системы автоматического управления.

Основная добыча газа на северных месторождениях России осуществляется за счет разработки чисто газовых залежей, главным образом, сеноманского продуктивного горизонта. При промышленной подготовке сеноманских газов к последующей транспортировке наибольшее распространение получила технология абсорбционной осушки газа с применением диэтиленгликоля (ДЭГ) в качестве основного абсорбента [1]. Следует отметить, что ДЭГ является достаточно дорогим сырьем, и сокращение потерь ДЭГ представляет собой одну из важнейших задач при эксплуатации установок комплексной подготовки газа (УКПГ). С другой стороны, необходимо четко выдерживать температуру точки росы для достижения необходимого качества осушки газа.

Типовая технологическая схема установки абсорбционной осушки газа обеспечивает циркуляцию ДЭГ по замкнутому контуру «сепаратор – теплообменник – выпарная колонна – теплообменник». Требуемый осушки газ, содержащий конденсационную влагу, поступает в абсорбер и поднимается вверх, проходя через систему тарелок. Навстречу газу по тарелкам стекает концентрированный раствор ДЭГ. Концентрированный раствор ДЭГ поглощает пары воды, сам при этом насыщаясь влагой, и концентрация его снижается с 99.3% масс. до 97.3% масс. Насыщенный раствор ДЭГ поступает в теплообменник, в котором нагревается встречным потоком регенерированного ДЭГ и далее проходит в выпарную колонну, где осуществляется регенерация раствора. Раствор ДЭГ, перетекая сверху вниз, контактирует с восходящим паровым потоком, идущим от испарителя, за счет чего происходит отпарка влаги. Регенерированный ДЭГ прокачивается через теплообменник. Водяной пар из выпарной колонны поступает в конденсатор, где основная часть пара конденсируется. Таким образом, потери ДЭГ происходят из-за уноса капель ДЭГ встречным потоком как в абсорбере, так и в выпарной колонне.

Для анализа поведения процесса осушки газа и последующего синтеза алгоритмов управления качест-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-08-00041-а)

вом осушки газа и снижением затрат на восполнение абсорбера необходимо иметь адекватную математическую модель рассматриваемого технологического цикла. При моделировании процессы тепло- и массопереноса, протекающие в абсорбере, регенерационной колонне и теплообменнике, рассматриваются как объекты с распределенными параметрами, что требует привлечения к решению задачи аппарата структурной теории распределённых систем [2, 3].

В качестве базовой модели процессов теплообмена и массопереноса была принята модель, описываемая уравнением [4]:

$$\frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial t} + v_1 \frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial x} + \alpha_1 Q_1(x,t) = f_1(x,t), \quad 0 \leq x \leq l \quad (1)$$

с граничными условиями на левом конце

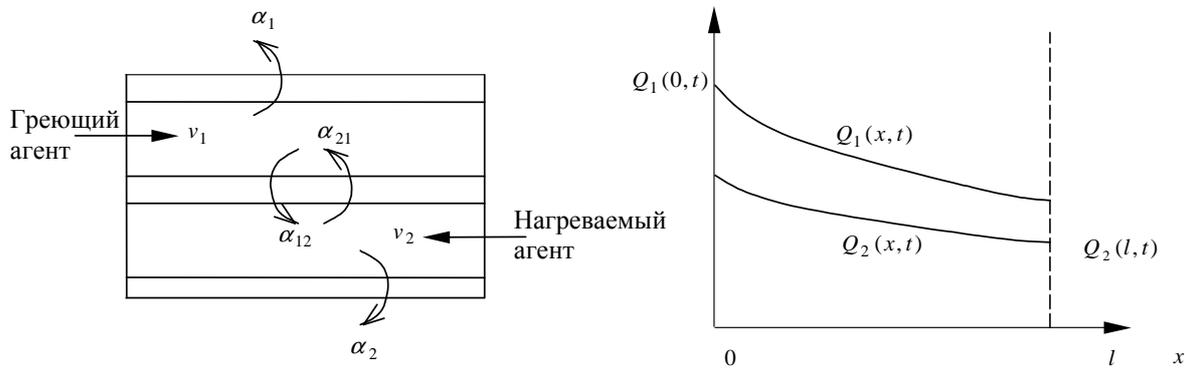
$$Q_1(0,t) = g_1(t), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

и начальным условием

$$Q_1(x,0) = Q_{01}(x). \quad (3)$$

Здесь $Q_1(x,t)$ в зависимости от рассматриваемого процесса имеет физический смысл температуры или концентрации, v_1 – скорость потока, $f_1(x,t)$ – функция, описывающая пространственное и временное распределение тепловых источников/источников вещества. Коэффициент α_1 имеет смысл коэффициента теплообмена нагреваемого агента с внешней средой. Для уравнения массопереноса коэффициент α_1 принимается равным нулю ввиду отсутствия потерь вещества. В дальнейшем исследовалась модель теплообмена, которая легко может быть вырождена в модель массопереноса с помощью соответствующих коэффициентов.

Во всех рассматриваемых установках имеет место встречное направление потоков взаимодействующих сред. Это позволяет рассматривать в качестве объекта управления противоточный теплообменник, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. В [2] приводится методика получения передаточных функций для прямоточного теплообменника. Противоточный теплообменник не рассматривался.



Р и с. 1. Принципиальная схема противоточного теплообменника

Температурное распределение греющего агента описывается уравнениями (1)–(3). Аналогичные уравнения, записанные для нагреваемого агента, будут иметь вид

$$\frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial t} - v_2 \frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial x} + \alpha_2 Q_2(x,t) = f_2(x,t), \quad 0 \leq x \leq l; \quad (4)$$

$$Q_2(l,t) = g_2(t), \quad t \geq 0; \quad (5)$$

$$Q_2(x,0) = Q_{02}(x). \quad (6)$$

Связь между греющими и нагревающими потоками осуществляется за счет тепловых потоков, имеющих место между ними. В случае линейного теплообмена по закону Ньютона, для того чтобы соединить системы (1)–(3) и (4)–(6), надо положить

$$f_1(x,t) = \alpha_{21} [Q_2(x,t) - Q_1(x,t)], \quad (7)$$

$$f_2(x,t) = \alpha_{12} [Q_1(x,t) - Q_2(x,t)]. \quad (8)$$

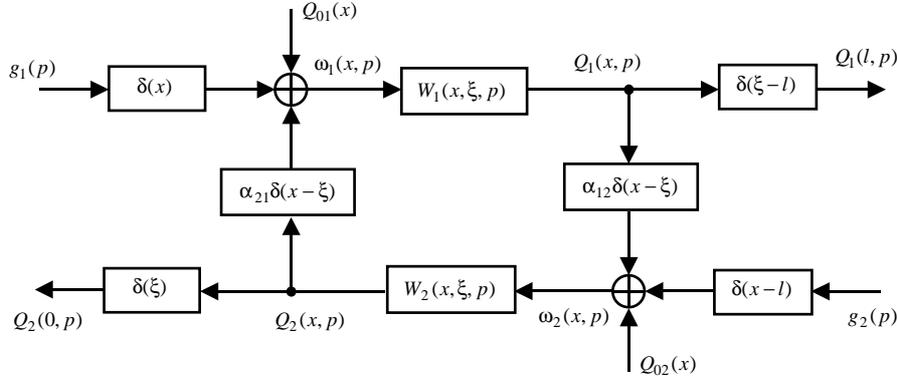
Коэффициенты α_{12} и α_{21} имеют смысл коэффициентов теплообмена между греющим и нагреваемым агентами и между нагреваемым и греющим агентами.

С учетом выражений (7) и (8) дифференциальные уравнения (1) и (4) примут вид

$$\frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial t} + v_1 \frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial x} + (\alpha_1 + \alpha_{21})Q_1(x,t) = \alpha_{21}Q_2(x,t); \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial t} - v_2 \frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial x} + (\alpha_2 + \alpha_{12})Q_2(x,t) = \alpha_{12}Q_1(x,t). \quad (10)$$

Структурная схема рассматриваемого объекта управления представлена на рис. 2. Переходные блоки на входах и выходах позволяют осуществить связь объекта с «сосредоточенной» системой контроля.



Р и с. 2. Структурная схема объекта управления

Согласно [2], передаточные функции $W_1(x, \xi, p)$ и $W_2(x, \xi, p)$ имеют следующий вид:

$$W_1(x, \xi, p) = \frac{\mathbf{1}(x-\xi)}{v_1} \cdot e^{-b_1(x-\xi)}, \quad v_1 > 0; \quad (11)$$

$$W_2(x, \xi, p) = \frac{\mathbf{1}(\xi-x)}{v_2} \cdot e^{-b_2(\xi-x)}, \quad v_2 > 0, \quad (12)$$

где $\mathbf{1}(\eta)$ – единичная функция:

$$\mathbf{1}(\eta) = \begin{cases} 0, & \text{при } \eta < 0, \\ 1, & \text{при } \eta > 0, \end{cases}$$

коэффициенты b_1 и b_2 определяются выражениями

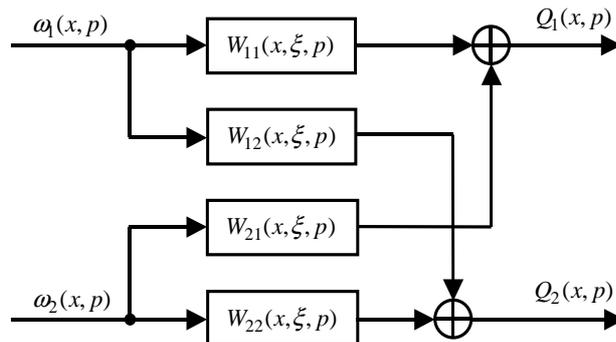
$$b_1 = \frac{1}{v_1}(p + \alpha_1 + \alpha_{21}), \quad b_2 = \frac{1}{v_2}(p + \alpha_2 + \alpha_{12}). \quad (13)$$

Структурную схему теплообменника, изображенную на рис. 2, можно представить в виде рис. 3 с помощью методов структурной теории распределенных систем.

Здесь $W_{ij}(x, \xi, p)$ – передаточная функция теплообменника от входа $\omega_i(x, p)$ к выходу $Q_j(x, p)$.

Матрица передаточных функций противоточного теплообменника найдена аналогично матрице прямоточного теплообменника в [2] и имеет следующий вид:

$$W(x, \xi, p) = \begin{bmatrix} W_{11}(x, \xi, p) & W_{12}(x, \xi, p) \\ W_{21}(x, \xi, p) & W_{22}(x, \xi, p) \end{bmatrix}. \quad (14)$$



Р и с. 3. Упрощенная структурная схема теплообменника

С помощью этой матрицы осуществляется связь внешних возмущений и состояний объекта:

$$\mathbf{Q}(x, p) = \mathbf{W}(x, \xi, p) \otimes \boldsymbol{\omega}(x, p),$$

или в координатной форме:

$$\begin{bmatrix} Q_1(x, p) \\ Q_2(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(x, \xi, p) & W_{12}(x, \xi, p) \\ W_{21}(x, \xi, p) & W_{22}(x, \xi, p) \end{bmatrix}^T \otimes \begin{bmatrix} \omega_1(x, p) \\ \omega_2(x, p) \end{bmatrix},$$

где знак \otimes обозначает операцию пространственной композиции [2].

Передаточные функции $W_{11}(x, \xi, p)$ и $W_{22}(x, \xi, p)$ являются решениями следующих интегральных уравнений соответственно [2]:

$$W_1(x, \xi, p) + \alpha_{12}\alpha_{21}W_1(x, \xi, p) \otimes W_2(x, \xi, p) \otimes W_{11}(x, \xi, p) = W_{11}(x, \xi, p), \quad (15)$$

$$W_2(x, \xi, p) + \alpha_{21}\alpha_{12}W_2(x, \xi, p) \otimes W_1(x, \xi, p) \otimes W_{22}(x, \xi, p) = W_{22}(x, \xi, p), \quad (16)$$

а передаточные функции $W_{12}(x, \xi, p)$ и $W_{21}(x, \xi, p)$ находятся путем решения интегральных уравнений

$$\alpha_{12}W_2(x, \xi, p) \otimes W_1(x, \xi, p) + \alpha_{12}\alpha_{21}W_2(x, \xi, p) \otimes W_1(x, \xi, p) \otimes W_{12}(x, \xi, p) = W_{12}(x, \xi, p), \quad (17)$$

$$\alpha_{21}W_1(x, \xi, p) \otimes W_2(x, \xi, p) + \alpha_{21}\alpha_{12}W_1(x, \xi, p) \otimes W_2(x, \xi, p) \otimes W_{21}(x, \xi, p) = W_{21}(x, \xi, p). \quad (18)$$

Рассмотрим интегральное уравнение (15). Выполняя операцию пространственной композиции, получим

$$W_1(x, \xi, p) + \alpha_{12}\alpha_{21} \int_0^l \left[\int_0^l W_1(x, \eta, p) \cdot W_2(\eta, \vartheta, p) d\eta \right] \cdot W_{11}(\vartheta, \xi, p) d\vartheta = W_{11}(x, \xi, p). \quad (19)$$

Рассчитаем значение интеграла в скобках в выражении (19). С учётом (11) и (12)

$$\begin{aligned} \int_0^l W_1(x, \eta, p) \cdot W_2(\eta, \vartheta, p) d\eta &= \int_0^l \frac{\mathbf{1}(x-\eta)}{v_1} \cdot e^{-b_1(x-\eta)} \cdot \frac{\mathbf{1}(\vartheta-\eta)}{v_2} \cdot e^{-b_2(\vartheta-\eta)} d\eta = \\ &= \frac{1}{v_1 v_2} \cdot \int_0^{\min(x, \vartheta)} e^{-b_1(x-\eta)} \cdot e^{-b_2(\vartheta-\eta)} d\eta = \frac{1}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot \left[e^{-b_1 x - b_2 \vartheta + (b_1 + b_2) \min(x, \vartheta)} - e^{-b_1 x - b_2 \vartheta} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя (11), (20) в (19), получаем интегральное уравнение Фредгольма второго рода

$$\begin{aligned} W_{11}(x, \xi, p) - \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot \int_0^l \left[e^{-b_1 x - b_2 \vartheta + (b_1 + b_2) \min(x, \vartheta)} - e^{-b_1 x - b_2 \vartheta} \right] \cdot W_{11}(\vartheta, \xi, p) \cdot d\vartheta = \\ = \frac{\mathbf{1}(x-\xi)}{v_1} \cdot e^{-b_1(x-\xi)}. \end{aligned} \quad (21)$$

Нелинейное уравнение (21) можно решить только численно, однако принимая во внимание, что нас интересует передаточная функция, описывающая влияние входов теплообменника на выходы, с учётом свойств δ -функций можем записать для $Q_1(l, p)$ и $Q_2(0, p)$ соответственно:

$$\begin{aligned} Q_1(l, p) &= \delta(\xi - l) \otimes W_{11}(x, \xi, p) \otimes \delta(x) \cdot g_1(p) + \delta(\xi - l) \otimes W_{21}(x, \xi, p) \otimes \delta(x - l) \cdot g_2(p) = \\ &= W_{11}(l, 0, p) \cdot g_1(p) + W_{21}(l, l, p) \cdot g_2(p), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Q_2(0, p) &= \delta(\xi) \otimes W_{22}(x, \xi, p) \otimes \delta(x - l) \cdot g_2(p) + \delta(\xi) \otimes W_{12}(x, \xi, p) \otimes \delta(x) \cdot g_1(p) = \\ &= W_{22}(0, l, p) \cdot g_2(p) + W_{12}(0, 0, p) \cdot g_1(p). \end{aligned} \quad (23)$$

Разбивая интеграл в (22) на два интервала $[0, x]$ и $[x, l]$ получаем

$$\begin{aligned} W_{11}(x, \xi, p) - \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot \left[\int_0^x \left[e^{-b_1 x + b_1 \vartheta} - e^{-b_1 x - b_2 \vartheta} \right] \cdot W_{11}(\vartheta, \xi, p) \cdot d\vartheta + \right. \\ \left. + \int_x^l \left[e^{-b_2 \vartheta + b_2 x} - e^{-b_1 x - b_2 \vartheta} \right] \cdot W_{11}(\vartheta, \xi, p) \cdot d\vartheta \right] = \frac{\mathbf{1}(x-\xi)}{v_1} \cdot e^{-b_1(x-\xi)}. \end{aligned} \quad (24)$$

Тогда для нахождения передаточной функции $W_{11}(l, 0, p)$ имеет смысл найти решение интегрального уравнения (24), которое в точке $x=l$, $\xi=0$ совпадает с решением уравнения

$$W_{11}(x,0,p) - \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \int_0^l \left[e^{-b_1x+b_1\vartheta} - e^{-b_1x-b_2\vartheta} \right] \cdot W_{11}(\vartheta,0,p) \cdot d\vartheta = \frac{1}{v_1} \cdot e^{-b_1(x-0)}. \quad (25)$$

Уравнение (25) – уравнение Фредгольма второго рода с вырожденным ядром [5], поскольку ядро уравнения можно представить в виде конечной суммы произведений пар функций, одна из которых зависит только от x , другая – от ϑ :

$$e^{-b_1x+b_1\vartheta} - e^{-b_1x-b_2\vartheta} = \sum_{k=1}^2 u_k(x) \cdot h_k(\vartheta).$$

Здесь

$$u_1(x) = e^{-b_1x}, \quad u_2(x) = -e^{-b_1x}, \quad h_1(\vartheta) = e^{b_1\vartheta}, \quad h_2(\vartheta) = e^{-b_2\vartheta}.$$

Решение интегрального уравнения (25) ищется в виде [5]:

$$W_{11}(x,0,p) = f(x,p) + \lambda \cdot \sum_{k=1}^2 u_k(x) \cdot A_k(p), \quad (26)$$

где $f(x,p) = \frac{1}{v_1} \cdot e^{-b_1x}$, $\lambda = \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)}$.

Функции $A_k(p)$ определяются из системы алгебраических линейных уравнений:

$$A_m(p) - \lambda \cdot \sum_{k=1}^2 s_{mk} \cdot A_k(p) = f_m(p), \quad m=1,2, \quad k=1,2, \quad (27)$$

где

$$s_{mk} = \int_0^l h_m(\vartheta) \cdot u_k(\vartheta) d\vartheta, \quad f_m(p) = \int_0^l h_m(\vartheta) \cdot f(\vartheta,p) d\vartheta, \quad m=1,2, \quad k=1,2. \quad (28)$$

Расчет коэффициентов (28) приводит к следующим результатам:

$$s_{11} = l, \quad s_{12} = -l, \quad s_{21} = -\frac{1}{b_1+b_2} \cdot [e^{-b_2l-b_1l} - 1], \quad s_{22} = \frac{1}{b_1+b_2} \cdot [e^{-b_2l-b_1l} - 1], \quad (29)$$

$$f_1(p) = \frac{l}{v_1}, \quad f_2(p) = -\frac{1}{v_1(b_1+b_2)} [e^{-b_2l-b_1l} - 1]. \quad (30)$$

Подставляя (29), (30) в систему (27), получаем выражения для функций $A_k(p)$:

$$A_1(p) = \frac{(b_1+b_2)^2 \cdot l \cdot v_2}{v_1v_2(b_1+b_2)^2 + \alpha_{12}\alpha_{21}(1 - e^{-b_2l-b_1l} - b_1l - b_2l)}, \quad (31)$$

$$A_2(p) = -\frac{(b_1+b_2) \cdot v_2 \cdot [e^{-b_2l-b_1l} - 1]}{v_1v_2(b_1+b_2)^2 + \alpha_{12}\alpha_{21}(1 - e^{-b_2l-b_1l} - b_1l - b_2l)}. \quad (32)$$

И далее, подставляя (31) и (32) в (26), получим выражение для $W_{11}(x,0,p)$ в точке $x=l$:

$$W_{11}(l,0,p) = \frac{1}{v_1} \cdot e^{-b_1l} - \frac{1}{v_1} \cdot \frac{\alpha_{12}\alpha_{21}(1 - e^{-b_2l-b_1l} - b_1l - b_2l) \cdot e^{-b_1l}}{v_1v_2(b_1+b_2)^2 + \alpha_{12}\alpha_{21}(1 - e^{-b_2l-b_1l} - b_1l - b_2l)}. \quad (33)$$

Выполняя аналогичную последовательность действий, получим передаточную функцию $W_{21}(l,l,p)$. Подставляя (20) в (18), можем записать уравнение Фредгольма второго рода для $W_{21}(x,\xi,p)$:

$$\begin{aligned} W_{21}(x,\xi,p) - \frac{\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \int_0^l \left[e^{-b_1x-b_2\vartheta+(b_1+b_2)\min(x,\vartheta)} - e^{-b_1x-b_2\vartheta} \right] \cdot W_{21}(\vartheta,\xi,p) \cdot d\vartheta = \\ = \frac{\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \left[e^{-b_1x-b_2\xi+(b_1+b_2)\min(x,\xi)} - e^{-b_1x-b_2\xi} \right], \end{aligned}$$

или, при $\xi = l$, разбивая на два интеграла и избавляясь от функции \min , получаем:

$$W_{21}(x, l, p) - \frac{\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \left[\int_0^x [e^{-b_1x+b_1\vartheta} - e^{-b_1x-b_2\vartheta}] \cdot W_{21}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta + \right. \\ \left. + \int_x^l [e^{-b_2\vartheta+b_2x} - e^{-b_1x-b_2\vartheta}] \cdot W_{21}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta \right] = \frac{\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot [e^{-b_2(l-x)} - e^{-b_1x-b_2l}]. \quad (34)$$

Отсюда находим $W_{21}(l, l, p)$, решая интегральное уравнение

$$W_{21}(x, l, p) - \frac{\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \int_0^l [e^{-b_1x+b_1\vartheta} - e^{-b_1x-b_2\vartheta}] \cdot W_{21}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta = \\ = \frac{\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot [e^{-b_2(l-x)} - e^{-b_1x-b_2l}], \quad (35)$$

которое при $x=l$ совпадает с решением уравнения (34).

После решения интегрального уравнения (35) получаем выражение для $W_{21}(l, l, p)$:

$$W_{21}(l, l, p) = \frac{\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot [1 - e^{-b_2l-b_1l}] + \\ + \frac{\alpha_{21}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \frac{\alpha_{21}\alpha_{12}(2l(b_1+b_2) \cdot e^{-b_2l-b_1l} + e^{-2l(b_2+b_1)} - 1)}{-v_1v_2(b_1+b_2)^2 + \alpha_{21}\alpha_{12}(b_1l+b_2l + e^{-b_2l-b_1l} - 1)}. \quad (36)$$

Для расчета $W_{22}(x, \xi, p)$ и $W_{12}(x, \xi, p)$ необходимо вычислить результат пространственной композиции $W_2(x, \xi, p) \otimes W_1(x, \xi, p)$:

$$\int_0^l W_2(x, \eta, p) \cdot W_1(\eta, \xi, p) d\eta = \int_0^l \frac{\mathbf{1}(\eta-x)}{v_2} \cdot e^{-b_2(\eta-x)} \cdot \frac{\mathbf{1}(\eta-\xi)}{v_1} \cdot e^{-b_1(\eta-\xi)} d\eta = \\ = \frac{1}{v_1v_2} \cdot \int_{\max(x, \xi)}^l e^{-b_1(\eta-x)} \cdot e^{-b_2(\eta-\xi)} d\eta = \frac{-1}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot [e^{b_2x-b_2l+b_1\xi-b_1l} - e^{b_2x+b_1\xi-(b_1+b_2)\max(x, \xi)}]. \quad (37)$$

Находим $W_{22}(0, l, p)$, решая интегральное уравнение

$$W_{22}(x, l, p) - \frac{-\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \int_0^l [e^{b_2x-b_2l+b_1\vartheta-b_1l} - e^{b_2x+b_1\vartheta-(b_1+b_2)\max(x, \vartheta)}] \cdot W_{22}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta = \frac{1}{v_2} \cdot e^{-b_2(l-x)} \\ W_{22}(x, l, p) - \frac{-\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \left[\int_0^x [e^{b_2x-b_2l+b_1\vartheta-b_1l} - e^{b_1\vartheta-b_1x}] \cdot W_{22}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta + \right. \\ \left. + \int_x^l [e^{b_2x-b_2l+b_1\vartheta-b_1l} - e^{b_2x-b_2\vartheta}] \cdot W_{22}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta \right] = \frac{1}{v_2} \cdot e^{-b_2(l-x)}. \quad (38)$$

В окрестности точки $x=0$ имеем

$$W_{22}(x, l, p) - \frac{-\alpha_{21}\alpha_{12}}{v_1v_2(b_1+b_2)} \cdot \int_0^l [e^{b_2x-b_2l+b_1\vartheta-b_1l} - e^{b_2x-b_2\vartheta}] \cdot W_{22}(\vartheta, l, p) \cdot d\vartheta = \frac{1}{v_2} \cdot e^{-b_2(l-x)} \quad (38)$$

Вновь вырожденное ядро интегрального уравнения Фредгольма второго рода (38) представляется в виде конечной суммы произведений пар функций:

$$e^{b_2x-b_2l+b_1\vartheta-b_1l} - e^{b_2x-b_2\vartheta} = \sum_{k=1}^2 u_k(x) \cdot h_k(\vartheta),$$

где

$$u_1(x) = e^{b_2x-b_2l-b_1l}, \quad u_2(x) = -e^{b_2x}, \quad h_1(\vartheta) = e^{b_1\vartheta}, \quad h_2(\vartheta) = e^{-b_2\vartheta}.$$

После расчёта соответствующих коэффициентов по выражениям (28) и решения системы алгебраических уравнений, подобной (27), получено выражение для $W_{22}(0, l, p)$:

$$W_{22}(0, l, p) = \frac{1}{v_2} \cdot e^{-b_2 l} - \frac{1}{v_2} \cdot \frac{\alpha_{12} \alpha_{21} (1 - e^{-b_2 l - b_1 l} - b_1 l - b_2 l) \cdot e^{-b_2 l}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)^2 + \alpha_{12} \alpha_{21} (1 - e^{-b_2 l - b_1 l} - b_1 l - b_2 l)}. \quad (39)$$

Интегральное уравнение, из которого может быть найдена $W_{12}(0, 0, p)$, будет согласно (17) иметь вид

$$W_{12}(x, 0, p) - \frac{-\alpha_{21} \alpha_{12}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot \int_0^l [e^{b_2 x - b_2 l + b_1 \vartheta - b_1 l} - e^{b_2 x - b_2 \vartheta}] \cdot W_{12}(\vartheta, 0, p) \cdot d\vartheta = \quad (40)$$

$$= \frac{-\alpha_{12}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} [e^{b_2 x - b_2 l - b_1 l} - e^{-b_1 x}],$$

Решая это уравнение, находим выражение для функции $W_{12}(0, 0, p)$:

$$W_{12}(0, 0, p) = \frac{\alpha_{12}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot [1 - e^{-b_2 l - b_1 l}] + \quad (41)$$

$$+ \frac{\alpha_{12}}{v_1 v_2 (b_1 + b_2)} \cdot \frac{\alpha_{21} \alpha_{12} (2l(b_1 + b_2) \cdot e^{-b_2 l - b_1 l} + e^{-2l(b_2 + b_1)} - 1)}{-v_1 v_2 (b_1 + b_2)^2 + \alpha_{21} \alpha_{12} (b_1 l + b_2 l + e^{-b_2 l - b_1 l} - 1)}.$$

Выражение (39) может быть получено из (36) путём замены индексов 1 и 2 по правилу $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 1$. Это справедливо и для выражений (36) и (41). Такой эффект возникает из-за симметричности уравнений задачи и симметричности структурной схемы (см. рис. 2).

Полученные выражения (33), (36), (39), (41) могут быть в дальнейшем использованы для параметрической идентификации сепаратора, выпарной колонны и теплообменника по результатам пассивного эксперимента, а также при синтезе систем автоматического управления рассматриваемыми объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.И. Гриценко, В.А. Истомин, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов Сбор и промысловая подготовка газа на северных месторождениях России.
2. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М., Наука, 1977.
3. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособ. М.: Высш. шк., 2005. 292 с.
4. А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л., Государственное энергетическое издательство, 1963.
5. Манжиров А.В., Полянин А.Д. Справочник по интегральным уравнениям: Методы решения. М.: Изд-во «Факториал Пресс», 2000. 384 с.

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2006 г.

УДК 004.891.2

К.Л. Куликовский, А.А. Вейс, Ю.В. Вейс, А.А. Ангельцев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ФИНАНСОВЫМИ ПОТОКАМИ

Рассмотрено применение интеллектуальной системы поддержки принятия решений для управления финансовыми потоками корпорации. Приведены недостатки существующих систем, указаны возможные пути их преодоления. В качестве инструмента реализации указанной системы предложена технология многоагентных систем.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений (ИСППР) по управлению финансовыми потоками предназначены для помощи лицам, принимающим решения (ЛПР) при планировании деятельности и управлении сложными объектами и процессами различной природы в условиях жестких временных ограничений и наличия различного рода неопределенностей (неполноты, нечеткости и противоречивости исходной информации, недетерминизма стратегий управления и т.д.).

Они предназначены для принятия решений по управлению финансовыми потоками и финансовыми рисками любого типа. Факторы стратегических финансовых рисков возникают во всех сферах деятельности предприятия, причем происходит их взаимодействие. Практически любые кризисные явления или даже эволюционные процессы в экономической, политической или социальной сферах в конечном итоге могут привести к финансовым потерям предприятия.

Для многих кризисных ситуаций недостаточно исследованы причинно-следственные отношения. В то же время необходимо в ограниченное время выработать приемлемое решение. Это указывает на необходимость концентрирования усилий по созданию интеллектуальных систем эффективного управления корпоративными финансами и разработки необходимых моделей и методов их реализации [1].

Целью проводимых исследований является выявление кризисов и чрезвычайных ситуаций и их преодоление и обеспечение приемлемого уровня безопасности, т.е. защита от угроз, дестабилизирующий или разрушительный эффект которых в наибольшей степени опасен для финансовой устойчивости корпорации. Для обеспечения управления стратегическими финансовыми рисками требуется наличие соответствующих механизмов и информации, которые позволяют решить ряд взаимосвязанных задач, включающих идентификацию и оценку частных и интегральных стратегических угроз.

Управление стратегическими финансовыми рисками включает:

- мониторинг (прогноз) характера и масштаба финансовых рисков;
- оценка состояния существующей или прогнозирование состояния перспективной системы мер по обеспечению финансовой безопасности (защита или парирование этих опасностей или угроз);
- оценка уровня (степени) обеспечения финансовой безопасности;
- определение комплекса мероприятий по ослаблению (нейтрализации) последствий рискованных (кризисных) ситуаций или повышению возможностей системы обеспечения финансовой безопасности.

Для их решения требуется выявление угроз или факторов (причины, противоречий), порождающий эти угрозы, и определения пороговых значений безопасности (защиты), подразумевая сознательный риск возможной реализации этих угроз в той или иной сфере деятельности предприятия. Указанные системы относятся к классу интегрированных интеллектуальных систем, сочетающих строгие математические методы и модели поиска решения с нестрогими, эвристическими (логико-лингвистическими) моделями и методами, базирующимися на знаниях специалистов-экспертов, моделях человеческих рассуждений и накопленном опыте.

В настоящее время в области планирования финансовых потоков организаций сложилась определенная парадигма. Назовем ее последовательным планированием. Суть ее заключается в том, что бюджеты составляются последовательно снизу вверх и сверху вниз, т.е. пока не составлен бюджет предыдущего уровня, нельзя составить бюджет следующего. Для предприятия можно выделить как минимум два уровня планирования – бюджет проекта (или отдела) и бюджет предприятия. Возможно также составление бюджетов проектов и отделов одновременно. Это будут бюджеты одного уровня, но показывающие планирование в разных разрезах. Для группы предприятий (ГП) добавляется еще один уровень планирования – управляющая компания (УК).

При всех неоспоримых преимуществах существующие системы планирования имеют недостатки. Их можно разделить на 2 группы:

- 1) относящиеся к отдельному предприятию;
- 2) относящиеся к ГП в целом.

К первой группе отнесем следующие.

1. Концепция бюджетирования состоит в том, что в бюджете (плане доходов и расходов) четко прописываются доходы, которых планируется достичь к определенным срокам, и расходы, которые нужно удерживать в определенных пределах. Этот подход является чрезвычайно негибким и ограничивающим в действиях. Любой готовый бюджет может содержать неточности. В процессе работы над бюджетом изменяются обстоятельства. Поэтому необходимо, чтобы бюджет не был совершенно неподвижным - должна оставаться возможность корректировать его как нужно и когда нужно. Однако такая корректировка не всегда возможна либо может занять продолжительное время. Тут можно говорить о вероятности исполнения бюджета. Чем грамотнее он составлен, тем больше вероятность его исполнения или тем меньше вероятность его корректировки, т.е. тем ближе бюджет к реалистичному.

2. Бюджетирование неизбежно влечет за собой массу бумажной работы в период, предшествующий составлению бюджетов, во время их составления и в последующий период, когда осуществляется текущий контроль за исполнением бюджетов, а также вероятны их изменения.

3. Даже когда бюджетирование хорошо отлажено и поэтому выполняется в соответствии с установленными процедурами, все равно оно остается процессом, требующим затрат времени.

К основным недостаткам второй группы отнесем следующие.

1. В системе планирования ГП объем бумажной работы будет еще больше из-за составления консолидированного бюджета после составления бюджетов предприятий. Кроме этого, требуется дополнительное время для составления консолидированного бюджета.

2. Корректировка бюджета ГП, т.е. консолидированного бюджета нескольких предприятий, представляется процедурой весьма громоздкой. Кроме того, корректировка бюджета любого из предприятий повлечет за собой корректировку консолидированного бюджета ГП.

Все эти недостатки обусловлены господствующей парадигмой. Однако в последнее время предпринимаются попытки внедрения другой парадигмы бюджетирования – «параллельной». В этом случае планирование ведется одновременно на всех уровнях. Затем бюджеты всех уровней согласуются между собой. Данный подход позволит максимально избавиться от недостатков классической параллельной схемы.

Однако реализация такого планирования в существующих системах сильно затруднена либо невозможна совсем. Необходима система бюджетирования, позволяющая составлять одновременно бюджеты всех уровней, согласовывать их между собой и при этом учитывать потребности и возможности каждого уровня. Также система должна учитывать вероятность исполнения бюджета, которая рассчитывается как некая функция от вероятности исполнения бюджетов нижних уровней. Предлагается составлять три варианта бюджета: оптимистичный, пессимистичный и реалистичный в зависимости от вероятности исполнения. В дополнение предлагается ввести понятие критических статей бюджета, т.е. 10% статей, изменение которых повлечет за собой максимальное изменение бюджета вплоть до его неисполнения.

Реализовать такую систему в полном объеме можно лишь при условии использования современных технологий конструирования интеллектуальных систем, основанных на концепциях распределенного искусственного интеллекта, систем обработки знаний (экспертных систем), динамических (адаптивных) моделей знаний, параллельной обработки информации при поиске решений на основе методов правдоподобного вывода и др., используя современные вычислительные системы и комплексы.

При построении подобных систем используются три фундаментальных и взаимодополняющих друг друга подхода в научном познании: системный, информационный и синергетический. Первые подходы в теории и практике управления являются традиционными уже более полувека [2].

Синергетический подход развивается с 80-х годов XX столетия и сосредотачивает внимание на процессах самоорганизации и внутреннего развития систем и определяет синергетический (нелинейный) эффект развития системы.

Технология решения ситуационных задач управления в ходе исследований конца XX столетия стала уже общепризнанной и достаточно полно изложена в публикациях. Однако особенности функционирования систем управления в настоящее время требуют углубленного исследования процессов управления в части интеграции методов оптимизации информационных процессов, моделей решения задач управления в условиях неполноты информации и риска [3].

В настоящее время теоретические и практические исследования в вопросах управления стали рассматриваться в триаде "Информация – Связь – Управление", которая включает как широкий круг отдельных вопросов, так и их взаимодействие. Этот уникальный подход объединяет теоретиков и практиков, а их взаимодействие содействует успешному решению проблемных вопросов на практике.

Главным отличием современных интеллектуальных систем является их распределенность, обеспечение обработки и применение распределенных знаний. Главный смысл происходящих в настоящее время смен концепций (парадигмы) создания и использования средств искусственного интеллекта – переход от предположений, справедливых только для изолированных систем искусственного интеллекта, от индивидуальных систем к распределенной обработке информации и разработке многоагентных интеллектуальных систем (МАС) [4].

Имеющаяся модель позволяет конструировать конкретную (прикладную) ИСППР на основе базовой (инструментальной) системы. Областью приложений разработанного комплекса выбран класс задач планирования, оценки и прогнозирования развития финансового положения предприятия. В качестве результата работы комплекса на АРМ руководителя как подсказка для выбора решения выдается информация, необходимая для принятия решения, а также могущая на него повлиять.

В предложенном комплексе применена технология многоагентных систем. Эти системы имеют множество типичных характеристик. Во-первых, они построены на обработке разнородной информации от пространственных источников. Во-вторых, потоки информации характеризуются большим объемом и имеют гомогенный и гетерогенный характер. В-третьих, обрабатываемые данные имеют различный физический смысл (сигналы, изображения, данные датчиков, видеоинформация и др.) и поступают в режиме реального времени. В-четвертых, эти данные могут быть неполными, неуверенными, представленными в различных структурах данных.

Созданный прототип (прикладной программный комплекс) обеспечивает сбор необходимых данных, их интеграцию, оценку, прогнозирование, выработку и поддержку решений в ограниченном объеме, что вызвало необходимость его существенной доработки.

В то же время прототип был создан как изолированная система искусственного интеллекта, обладающая всеобъемлющей информацией о ситуации и принимающая решение по ней. Однако в обработке входной информации по управлению финансовыми рисками участвует коллектив исполнителей, формирующий коллективное решение. Данная особенность удачно реализуется средствами интеллектуальных агентов

МАС. Это привело к пересмотру концептуальной модели макета по переходу, как сказано выше, от индивидуальных систем к распределенной обработке информации.

В современных условиях перехода к информационному обществу, рыночной экономике, сокращения объемов финансирования работоспособность любого проекта (изделия) может быть достигнута лишь в условиях конкурентоспособности. Это значит, что любой проект должен разрабатываться на основе концепции открытых систем, с использованием установленных стандартов и интерфейса для профиля систем управления (стандарты ISO) и обеспечения необходимого качества и надежности программного обеспечения.

Сущность технологии открытых систем, определяющих эффективность информационно-вычислительных систем всех уровней, состоит в обеспечении:

- открытости к внешней среде;
- возможности расширения и модернизации;
- унифицированного обмена данных между различными компьютерами;
- переносимости прикладных программ между различными платформами (интероперабельности);
- мобильности исполнителей.

Задача открытых систем – обеспечение согласованности их компонент, организация их интероперабельности и устранение несоответствия внутреннего представления данных в каждом компоненте системы (подсистемы).

Одной из основных проблем при создании распределенных информационных систем является организация взаимодействия с источниками информации, т.е. интеграция приложений. Она обусловлена тем, что источники информации создавались в разное время, на различных платформах, архитектурах и технологиях с соответствующими протоколами и интерфейсами. Физическая распределенность и логическая несовместимость подсистем являются препятствиями для обеспечения их совместимости в работе.

На сегодняшний день сформировались три подхода обеспечения взаимодействия подсистем. Первый подход - полная замена старых разработок и замена новыми, связанная с потерей сделанных разработок. Подход очень дорогой, он может быть реализован простым соединением, но при наличии точных знаний информации о партнере.

Второй подход обеспечивает доступ к ранее разработанным системам с использованием новых интерфейсов и написанием новых программ. Подход сохраняет существующие системы, но реализует уже достаточно устаревшие сценарии взаимодействия между системами. Он обеспечивается применением различных адаптеров, их настройкой на конкретную среду.

Наиболее предпочтительным является взаимодействие систем через различные сценарии, упорядочивающие последовательность сложных процессов передачи данных и управление с обеспечением реакции на различные типы событий. Сценарий такого взаимодействия можно варьировать от довольно простого до весьма сложного. Интегрированное решение должно так же отслеживать сложную логику взаимодействия систем и использовать определенные исполнительные и контролирующие правила. Центральным узлом интеграционной среды является интеграционный сервер или брокер, к которому обращаются интегрируемые системы. Через сервер направляются потоки данных с этих подсистем, и он перераспределяет, обрабатывает и направляет эти потоки. Централизованное исполнение функций обработки информации и данных обеспечивается использованием общего репозитория. Правила из общего репозитория обозримы и прозрачны и могут легко дополняться и изменяться при изменении процессов и состава вычислительной среды, что позволяет эффективно управлять интеграционным решением.

Эффективное управление интеграционным процессом достигается использованием перспективной технологии интеграции – системы очередей сообщений. Система очередей поддерживает асинхронное взаимодействие распределенных приложений и позволяет гибко интегрировать разнообразные прикладные системы, не меняя внутренней логики их работы. Система очередей реализуется агентами МАС – агентами менеджеров очереди. Для обеспечения функционирования интеграционного сервера необходимы разнообразные инструментальные средства начиная со средств разработки новых форматов и процедур обработки до средств администрирования, мониторинга и диагностики. В настоящее время осуществляется их разработка с использованием стандартов SQL.

Технология МАС реализуется сообществом агентов, в котором помимо интеллектуальных агентов имеются простые агенты – механизмы, в задачу которых входит сбор и передача информации; агенты поиска, которые суммируют пакеты информации и сортируют их по нужным адресам (функция почтамта) и т.д. В случае интеграционных решений агенты выполняют функции людей-пользователей (интеллектуальные агенты) и приложений – автоматов-серверов, контроллеров, терминалов и маршрутизаторов и т.д. Для функционирования сообщества агентов формируется архитектура их взаимодействия, а их функции реализуются программным путем. Таким образом, агенты рассматриваются как механизмы, обеспечивающие выработку решения в условиях ограниченных ресурсов и процессорных мощностей.

Важным фактором обеспечения взаимодействия всех систем является наличие разработанной онтологии данной предметной области.

Онтология – это философская категория, существующая множество столетий и означающая учение о бытии. В рамках этого направления в последние годы развивается формальная онтология – учение, изучающее сущности с точки зрения их формальных свойств. Онтология – это формальная спецификация концепций предметной области, выраженная средствами языка представления знаний. Онтологический уровень, ранее не рассматривавшийся в классификации знаний, в настоящее время выполняет связующие функции между верхними и нижними уровнями представления знаний и представляет собой формализмы и примитивы, позволяющие явно специфицировать формальную структуру концептуальных единиц и их взаимосвязи.

Включение концепции онтологии обусловлено необходимостью обеспечения управления финансовыми рисками в создаваемой системе. В ее различных подсистемах фигурируют различные объекты (факторы, противоречия, причины): внутренние и внешние; экономические, политические и социальные; противоположные интересы и т.д. Идентификация используемых понятий в подсистемах и согласованность их как части целого во имя общей цели достигается на основе онтологии.

Несмотря на довольно абстрактное содержание онтологии, ее ценность заключается в том, что она упрощает проведение анализа слабоструктурированных задач. В них с трудом отыскивается подходящая схема организации знаний. Использование онтологии исключает появление в процессе разработки некоторых пропусков ("белых пятен") и противоречий. В данном случае онтология включает онтологию предметной области – системы управления, онтологию решаемой задачи – интеллектуальные системы поддержки принятия решений, онтологию приложения – интеллектуальная система поддержки принятия решения по разработке оптимального финансового решения.

Главными инструментами анализа сущностей в рамках онтологии является теория идентичности, целостности; теория части и целого; теория зависимости.

Для обеспечения семантической интероперабельности компонент в прототипе системы используется формальная модель прикладной онтологии:

$$M = \langle C, R, \Phi, A \rangle,$$

где C - множество понятий предметной области; R - множество отношений между понятиями; Φ - механизм интерпретации понятий и отношений онтологии; A - используемые аксиомы.

Указанная модель позволяет описать отношения между объектами (понятиями) и осуществить их интерпретацию для каждого конкретного случая. В базе данных хранятся концепции онтологии различных сценариев из предметной области критических ситуаций и их взаимосвязь. Прикладная онтология является основой для организации семантической интероперабельности компонент комплекса моделирования.

Семантическая модель, основанная на формализованном представлении предметной области, позволяет автоматизировать формирование моделей принятия решений. Реализация прикладной онтологии и интегрированных решений дает возможность осуществить создание системы как открытой информационной системы, способной самостоятельно приобретать новые знания и изменять свою структуру и функции, развиваясь и адаптируясь к изменениям во внешней среде.

Не менее важным является выбор необходимых математических моделей в системе. В данной работе реализуется аппарат распределенного искусственного интеллекта, когда отдельный агент может иметь лишь частичное представление о задаче и способен решать лишь некоторую ее подзадачу. Поэтому для решения сложной проблемы требуется взаимодействие агентов, которое определяет коллективное согласованное решение. Взаимодействие агентов обуславливает организацию МАС.

Данный набор представляет множество формальных и логико-лингвистических моделей, реализующих определенные процессы обработки информации.

При организации моделирования МАС реализована концепция интеллектуального агента, предусматривающая динамическую систему как множество интеллектуальных агентов, функционирующих в определенной среде и взаимодействующих друг с другом и с внешней средой.

Интеллектуальный агент описывается следующей моделью:

$$M = \langle AA, PA, STA, RA, Fvx \rangle,$$

где AA – модель проблемной области, используемой ИА при принятии решений; PA – механизм выбора агентом управляющих решений; STA – множество целей агента; RA – множество возможных правил поиска решения агентом; Fvx – множество возможных воздействий со стороны внешней среды и других ИА.

В процессе моделирования ситуации интеллектуальный агент собирает детальную информацию от различных источников в реальном масштабе времени, обобщает и интерпретирует эти данные, участвует в подготовке коллективного решения и контролирует его выполнение. Основой для функционирования интеллектуальных агентов при обработке информации является алгоритм функционирования многоагентной

системы формирования управленческого решения. Деятельность агента в этом случае связана со следующими функциями:

- сбор информации от различных источников;
- формирование базы данных по сложившейся ситуации;
- активизация и моделирование системы прогнозирования;
- подготовка проекта решения в части обработанной информации;
- информация других агентов;
- участие в кооперативном (совместном) решении;
- мониторинг течения ситуации и выработка новых знаний;
- контроль выполнения решения и выработки управляющих воздействий по разрешению ситуации.

Как сказано выше, конкурентоспособность проекта определяется требованиями к качеству и надежности программного обеспечения. При реализации открытых систем огромная роль принадлежит технологиям создания программного продукта. Эти технологии имеют тенденцию снижения сложности и повышения производительности процессов разработки.

Эволюция программирования сопровождается повышением уровня абстракции написания программ – от машинных кодов к ассемблеру, от ассемблера к высокоуровневым языкам. Все чаще возникает потребность в интеграции и обеспечении взаимодействия систем, основанных на разных технологиях, а также в модернизации существующих программ и их переработке в соответствии с новой технологической основой. В настоящее время альтернативными технологиями являются объектно-ориентированное программирование и технология искусственного интеллекта. Наряду с созданием этих технологий происходит разработка инструментальных средств для реализации модельно-ориентированной технологии (MDA – Model Driven Architecture) предложенной консорциумом OMG. Модельно-ориентированный подход облегчает интеграцию как разнородных, основанных на различных технологиях, распределенных систем, так и организацию взаимодействия между системами, основанными на одной технологии, но использующими разные интерфейсы, стандарты. В основе MDA лежит понятие платформно-независимой модели (platform independent model, PIM), представляющая детально исполняемую модель на языке действий с пред- и постусловиями на языке UML, не зависящем от платформ и технологии. Фактически PIM-модель представляет собой каркас, основу системы, описанную не зависящим от технологий реализацией образом (язык программирования, распределенные технологии, доступ к базам данных и т.д.). Эта модель воспроизводит логику, основные задачи и принципы функционирования приложения [5].

PIM-модель – это модель тестирования и отладки, позволяющая затем вносить необходимые уточнения в интересах конкретной платформы. Построенная PIM-модель преобразуется в платформно-зависимую модель (platform-specific model, PSM). Это преобразование производится с помощью стандартных отображений, разных для каждой платформы промежуточного слоя – CORBA, Java, Net, Web-службы и другие. Благодаря тому, что преобразование от PIM к PSM стандартизировано, создаются анализаторы и генераторы описания моделей, существенно упрощающие это преобразование. В настоящее время коллектив разработчиков осваивает MDA-технологию [6].

Центральным вопросом при реализации концепции MAC является разработка путей координации поведения агентов. В работе технология MAC реализована под метафорой "пункт управления", отражающей схему взаимодействия между исполнителями в данной ситуации.

Интеллектуальные агенты имитируют работу физических агентов – коллективы исполнителей (должностных лиц) на пункте управления. Работа технических средств системы обеспечивается агентами других классов – связи, управления, транспортировки и т.д.

Применяется концептуальная модель MAC формирования вариантов управленческих решений. Используется сочетание принципов планирования процессов сбора и обработки данных в "пространстве задач" и в пространстве состояний.

При описании процесса использована семиотическая модель, отражающая когнитивный подход к моделированию познавательной деятельности человека. В работе синтезирован алгоритм координации поведения агентов в системе. Он реализует две основные фазы управления: планирования процесса решения и реализации плана. Для их описания использован сценарный подход, определяющий последовательность действий агентов при планировании процессов сбора данных и их обработки.

Руководитель коллектива (ЛПР) анализирует состояние отдельных агентов, выявляет конфликтующие ситуации (критические области) и принимает по ним решения. В основу заложена схема коммутации технологии сбора информации и ее анализа и методов использования этих результатов при принятии решений. Осуществляется интеграция знаний со сведениями об изменениях в исследуемых объектах, учет вновь поступающей информации для семантического моделирования динамического процесса.

Управление интеллектуальными агентами осуществляется динамической экспертной системой. Она

обеспечивает адаптивный и детерминированный переход системы из одного состояния в другое, используя модели внешней среды, процессы деятельности системы и модели взаимосвязи. Модель деятельности – это, по сути, сценарий, содержащий такие элементы, как основные этапы процесса деятельности, функции и взаимодействие агентов, ситуации, события, описание событий и временные рамки. Координация и взаимодействие агентов осуществляются реализацией таких событий, как получение информации о состоянии внешней среды и о собственном состоянии, а также об участии в формировании решений по разрешению ситуации.

Рассмотренные в статье подходы к созданию интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению финансовыми потоками и экспериментальное моделирование на первоначальном варианте ее прототипа позволяют сделать вывод о возможности ее создания и полной практической реализации. В настоящее время осуществляется программная реализация указанных подходов при совершенствовании прототипа ИСППР в рамках технологии многоагентных интеллектуальных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Некоторые базовые принципы построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений реального времени / Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2001. №6. С.114-226.
2. Потапов А.В., Миргалеев А.Т., Ющенко С.П. Алгоритм функционирования многоагентной системы формирования описания угроз локальной безопасности субъектов РФ: Матер. междунар. конф. и Российской научной школы. Секция №8. М.: Радио и связь, 2003.
3. Чекинов Г.П., Чекинов С.Г. Ситуационное управление: состояние и перспективы. Приложение к журналу "Информационные технологии". 2004. №2.
4. Андреев В.В., Батищев С.В., Виттих В.А. и др. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений / Известия АН. Теория и системы управления. 2003. №1. С.126-137.
5. Кузнецов М. MDA – новая концепция интеграции приложений. Открытые системы. 2003. №9. С. 48-51.
6. Игнатович Н. Брокер интеграции приложений / Открытые системы. 2003. №9. С. 8-14.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2007 г.

УДК 004.382

И.А. Минаков

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МЕТАПОИСКА В СЕТИ ИНТЕРНЕТ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО НАХОЖДЕНИЯ И МОНИТОРИНГА РЕЛЕВАНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматривается проблема мониторинга информации в сети Интернет в актуальной области малых космических аппаратов, предлагается инструментальная метапоисковая система, предназначенная для решения данной задачи, описывается подход, архитектура, онтология, пример использования, анализ результатов и перспективы развития.

Введение. Малые космические аппараты – эволюционное развитие космических технологий

Анализ тенденций развития космических технологий показывает, что одним из наиболее перспективных путей их совершенствования является применение малых космических аппаратов (МКА) и систем на их основе. Побудительным мотивом для перехода от создания и использования крупных универсальных спутников к МКА стал прорыв в электронике, двигателестроении, в области создания новых конструктивных материалов и других областях. МКА имеют следующие преимущества [1]:

- низкая стоимость, обусловленная в значительной мере их серийной пригодностью, позволяющая создавать при умеренных затратах (по оценкам специалистов, затраты за килограмм полезной нагрузки на изготовление малых космических аппаратов в 5-10 раз меньше) системы с высокой насыщенностью орбитальных группировок, что особенно важно для систем военного назначения и коммерческих связанных систем;
- малый срок создания (12-14 месяцев), что устраняет опасность морального старения и обеспечивает оперативное изменение характеристик космических систем при возникновении новых требований путем постепенной замены КА в составе орбитальной группировки;
- уменьшение рисков, связанных с запуском и работой в космосе МКА, за счет снижения финансового бремени потерь в случае отказа или утраты такого спутника;
- возможность оперативного массированного наращивания систем при изменениях военно-политической обстановке, чрезвычайных ситуациях и в других случаях.

Экономическая эффективность и возможность быстрого тиражирования позволяет использовать МКА в качестве “полигонов отработки” ключевых элементов космической техники, а также для проведения исследований и экспериментов в космосе, отработки новых космических технологий. В перспективе же планируется создание орбитальных систем из взаимодействующих КА мини-, микро-, пико- и даже наноклассов, которые могут превзойти возможности современных КА с большими платформами.

Уже сейчас МКА используются в таких областях, как Интернет-технологии, телекоммуникации, навигация, метеорология, дистанционное зондирование Земли и акватории океанов, научные исследования.

Федеральной космической программой России на период 2006-2015 гг. предусмотрено создание целой серии малых космических аппаратов (МКА) массой в сотни и десятки килограммов, способных выполнять задачи, которые еще 10 лет назад были по силам лишь многотонным спутникам.

Сегодня разработка малых космических аппаратов на базе унифицированных платформ является важнейшим направлением работ почти всех российских конструкторских организаций в области космической техники.

В силу перспективности МКА для космической промышленности России в рамках анализа существующих и планируемых решений, имеющихся на мировом рынке и предлагаемых странами-партнерами и конкурентами, становится необходимым постоянный мониторинг имеющейся и появляющейся информации, и особенно, в связи с все возрастающей популярностью Интернета, анализ электронных документов – новостных лент, специализированных порталов, блогов.

Проблема Интернет-поиска релевантных информационных ресурсов в выбранной предметной области

Поиск информационных ресурсов в сети Интернет де-факто стал одним из основных источников получения новых информационных данных в сегодняшнем научно-техническом сообществе.

Но, к сожалению, все имеющиеся на текущий момент технологии поиска, включая поиск по ключевым словам, поиск с использованием операндов булевой алгебры, поиск с расстоянием (при котором пользователь указывает, на каком расстоянии между собой должны располагаться ключевые слова в документе), построение нового запроса на базе предыдущего, поиск в определенных полях html-документа и морфологический поиск, все равно не обеспечивают основного – не дают возможность проанализировать семантику документа, выявить его реальный смысл (который зачастую противоречит указанным в нем ключевым словам, так как они были указаны с целью занятия более высокого положения в поисковых системах).

Помимо этого имеющиеся поисковые системы весьма плохо определяют актуальность предлагаемой информации, зачастую предлагая устаревшие статьи и новости, информация в которых хоть и была когда-то популярной, но более не соответствует действительности.

Для решения указанных проблем требуется разработать систему, которая позволяла бы в удобной форме специфицировать интересующую предметную область (в данном случае – космические технологии и МКА), наполнить ее предметно-ориентированными знаниями и получить возможность анализировать возвращаемые поисковыми системами тексты с точки зрения семантики, отделяя релевантные тексты от ошибочных, анализируя степень релевантности текста запросу. При этом интересующие сайты, блоги, новостные порталы и отдельные страницы можно было бы поставить на постоянный мониторинг с тем, чтобы в заданные промежутки времени они вновь проверялись на наличие интересующей информации, а устаревшая информация отсеивалась.

Предлагаемый подход и архитектура системы

Для решения поставленной задачи предлагается подход, основанный на мультиагентной технологии [2] и заключающийся в возможности представления смысла документа в виде семантического дескриптора на основе онтологии, который затем можно обрабатывать и анализировать в зависимости от запросов пользователя [3].

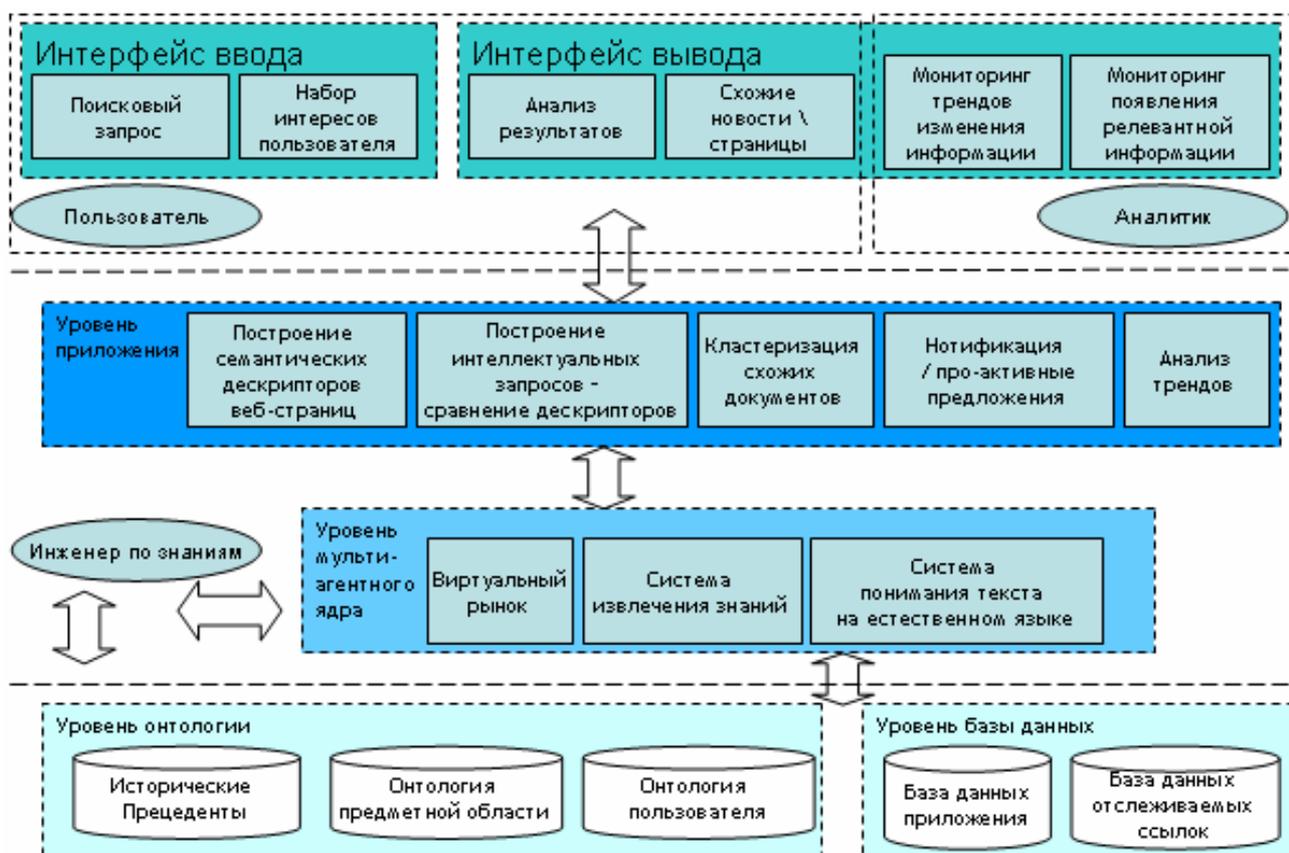
Общая архитектура системы приведена на рис. 1.

Таким образом, можно получить исходный список интересующих пользователя документов, учитывая ключевые слова запросов, с помощью обычной поисковой системы (например, Google, Yahoo или Yandex), затем преобразовать сайты / блоги / новости в форму семантических дескрипторов и далее типовые запросы пользователя представить в виде семантических дескрипторов, сравнивая их с дескрипторами документов, на основе предлагаемой технологии кластеризации [4] и понимания текста на естественном языке [5].

Основным отличием данной задачи от проблемы, описанной и решенной в [6], является то, что в силу особенностей сайтов в Интернете и алгоритмов поисковых систем лексикон возвращаемых документов и их предметные области могут быть самыми различными, а не узкоспециализированными, как в [6]. Поэтому

му требуются более разнообразная и разноплановая онтология, большой словарный запас в морфологии, большая устойчивость к ошибкам при построении дескрипторов и при анализе запросов.

Ряд сайтов, заинтересовавших пользователя, может быть поставлен на постоянный мониторинг, где страницы будут импортироваться в систему с указанной периодичностью и анализироваться согласно набору запросов, интересующих пользователя; критерием анализа и нотификации является порог качества результатов.



Р и с. 1. Общая архитектура системы

Дополнительной функциональностью является возможность нахождения в имеющейся базе статей и ссылок тех документов, которые схожи с просматриваемым. Это осуществляется аналогично путем сравнения семантических дескрипторов, но ориентировано на решение другой задачи – либо отслеживание истории изменения \ развития какой-либо идеи или проекта, либо нахождение решений, альтернативных данному.

Также существует модуль мониторинга появления релевантной информации, который для выбранного сайта с заданной периодичностью сравнивает новое содержание с хранящимся в базе и в случае изменений вновь прогоняет набор запросов, интересующих пользователя; если выявляется новая релевантная информация, то пользователь получает нотификацию.

Модуль мониторинга трендов изменения информации позволяет отслеживать, как часто тот или иной онтологический концепт встречался в анализируемых документах с течением времени, с тем чтобы оперативно распознавать намечающиеся тенденции в разработках космических технологий и проектов.

Построение онтологии малых космических аппаратов на основе набора запросов, покрывающих предметную область

Общий алгоритм построения онтологии для интересующей нас предметной области (малые космические аппараты) заключался в следующем. Были проанализированы наиболее популярные запросы по ключевым словам к поисковым системам в этой области (для изучения популярных ключевых слов и запросов можно рекомендовать следующую ссылку: <http://inventory.overture.com/d/searchinventory/suggestion/> , а также поисковые системы Clusty и Nigma).

В частности, на текущий момент основные интересы, связанные с МКА, заключаются в следующих запросах: small satellites + systems, applications, launches, organizations, news, technology, research, development, conference, information, future, companies, missions.

Далее по каждому из запросов был проведен анализ сайтов, отвечающих данным запросам. По алгоритмам, описанным в [7], были выявлены основные термины, включая концепты онтологии, отношения между ними и значения атрибутов (фрагмент автоматически построенной таким образом онтологии можно видеть на рис. 2).

Далее онтология была вручную отсортирована и дополнена. В итоге текущая версия онтологии малых космических аппаратов составляет более 2000 концептов. В первую очередь, выделены классы МКА – мини, микро, нано, пико, фемто. Для каждого из классов найден набор имен существующих спутников (в частности, для класса мини это наши спутники класса COSMOS (2337-39, 2390-1 (2002), 2384-6 (2001) и пр.) и GONETS (12-14 (2001), D1-1-3 (1996) и пр.), американские SORCE (2003), RHESSI, серия GLOBALSTAR M, японский MDS-1 и т.д.).

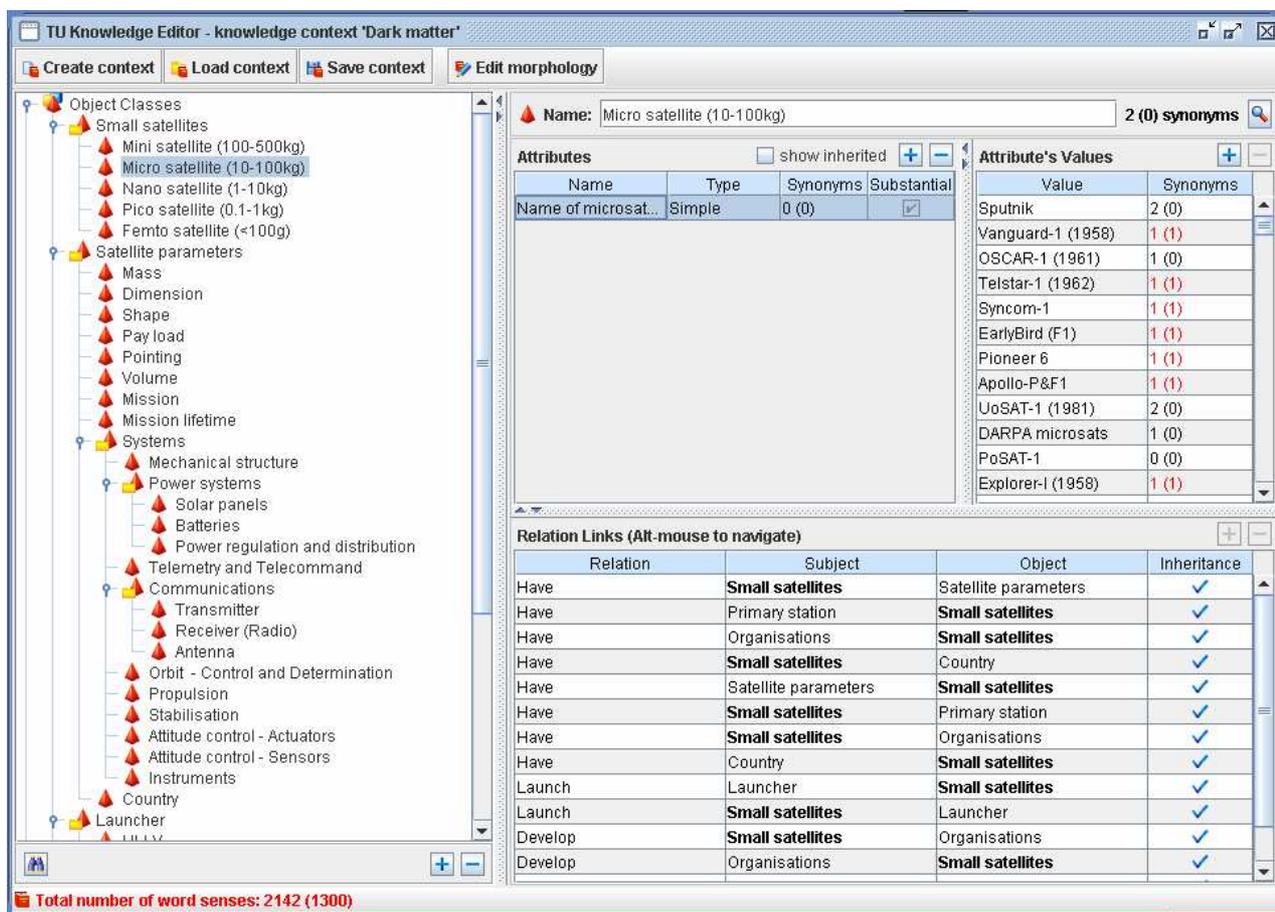
Выделены параметры малых спутников, в том числе масса, полезная нагрузка, габариты, форма, бортовая и полезная емкость, тип орбиты, источники питания, каналы связи, типы двигателей \ горючего, датчики, стабилизация, тип оборудования, тип миссии и пр.

Для каждого из параметров выделены возможные значения, например, для propulsion возможные значения: chemical rocket, bipropellant, air-breathing engine, monopropellant, resistojet, electric propulsion, ion thruster, solar sail, aerobraking, nuclear reactor и пр. (более 30 значений)

Также выделены типы ракет-носителей и их названия (например, для heavy lift launch vehicles – Ariane 5, Protone D1, Titan III-IV, Zenith Sealauncher и пр.), наземных баз, организаций.

Также в онтологию добавлен ряд типовых названий (имена стран, названия фирм, организаций и университетов, конференции, имена ученых и пр.).

Всего в системе насчитывается около 2000 концептов, из них ~15 отношений, ~300 объектов. У каждого объекта имеется в среднем порядка 6 свойств и атрибутов (имеется в виду класс атрибута; ясно, что конкретных значений в классе, например, названий стран или имен спутников, значительно больше). Для каждого элемента в среднем существует 4 синонима (например, наземная станция управления полетами США Vandenberg air force base в различных источниках также упоминается как Vandenberg AFB, VAFB, VBAFB, Vandenberg, Vandenberg base, Vandenberg air force. При этом просто Vandenberg без контекста возвращает ссылки на музыкальную рок-группу с аналогичным названием).



Р и с. 2. Фрагмент онтологии предметной области, построенной автоматически на основе анализа ряда сайтов, возвращенных по типовым запросам

С учетом всех значений атрибутов и синонимов общее количество слов в тезаурусе составляет порядка 15 тысяч.

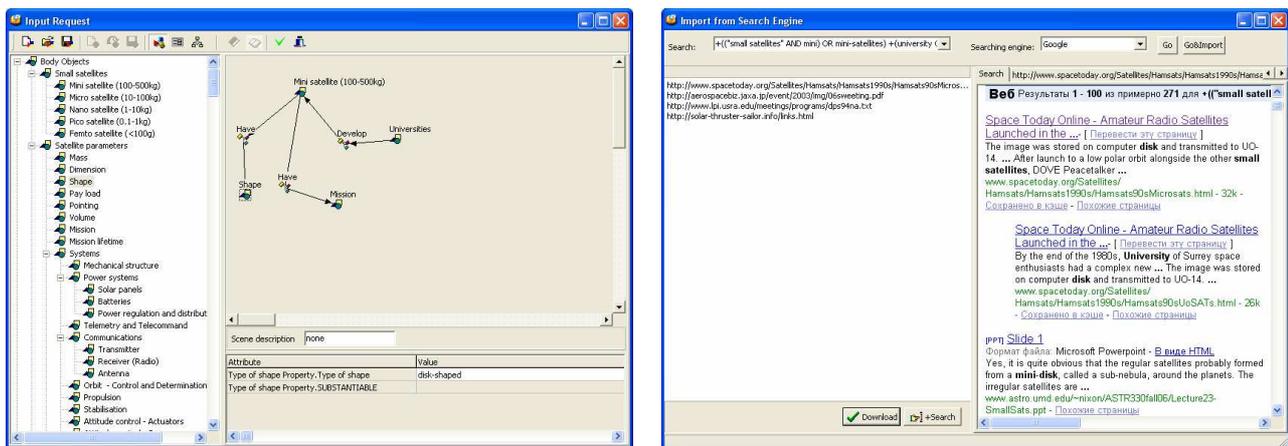
По экспертной оценке, данная онтология уже сейчас покрывает большинство требуемых терминов в области МКА и может быть хорошей основой для дальнейшего расширения знаний о предметной области.

Пример работы системы

Разберем по шагам процесс работы системы. Первым этапом является создание онтологии предметной области (космическая технология и МКА), разобранный в предыдущем параграфе.

Предположим, что теперь необходимо выяснить доступную в Интернете информацию по следующей интересующей нас теме: «Мини-спутники, разработанные для коммерческого использования научными заведениями Европы и имеющие форму диска».

Для данного запроса, который может задаваться как в виде текста на естественном языке, так и в виде семантического дескриптора (рис. 3), формируется набор запросов – комбинаций ключевых слов, которые поступают на вход поисковых машин.

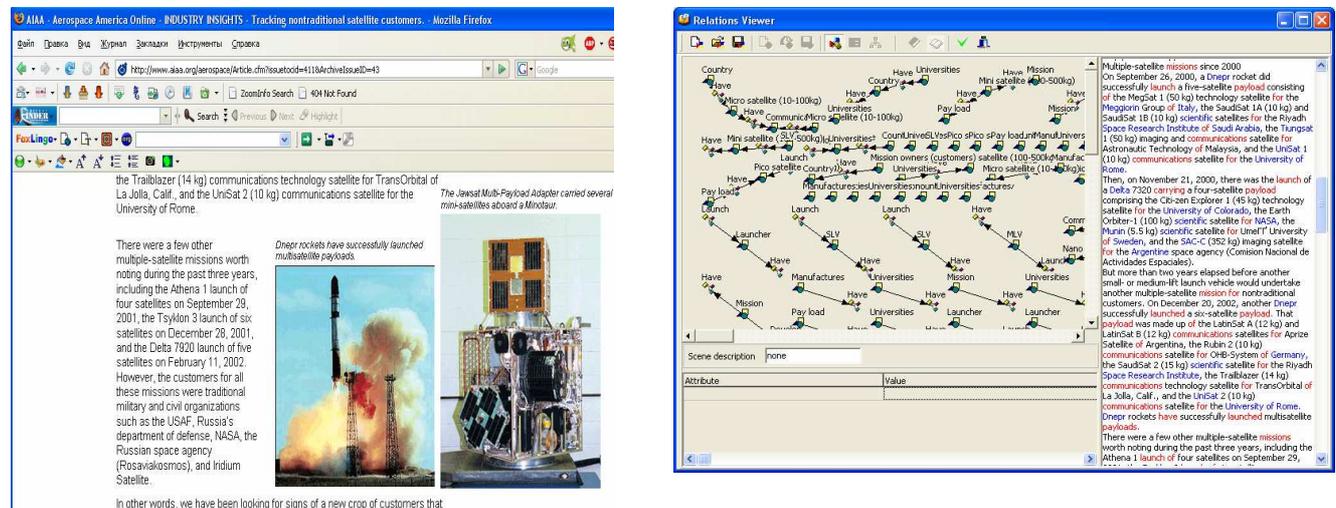


Р и с. 3. Конструирование запроса и импорт файлов в систему

Например, для данного запроса может быть сформирована комбинация вида «+(("small satellites" AND mini) OR mini-satellites) +universities Europa +(disk OR disk-shaped)»

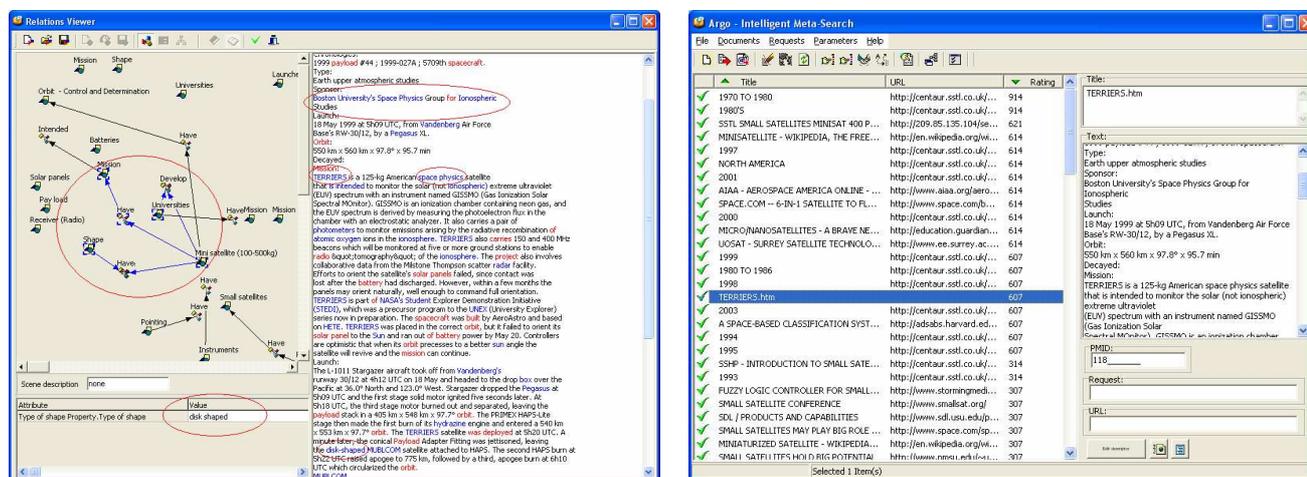
Далее из ряда поисковых систем, включая Google (www.google.com), Yahoo (www.yahoo.com), AOL (www.aol.com/netfind), Excite(www.excite.com), Yandex (www.yandex.ru), Rambler (www.rambler.ru) по результатам запроса может быть импортирован ряд сайтов, возвращенных данными системами.

Для каждого импортированного документа на основе онтологии предметной области создается семантический дескриптор, отражающий смысл данного сайта (подробнее об алгоритме преобразования текста в семантический дескриптор см. [3,5]). Пример преобразования Интернет-страницы сайта в семантический дескриптор можно найти на рис. 4.



Р и с. 4. Создание семантического дескриптора для выбранного сайта

Далее происходит сравнение семантических дескрипторов запроса и документов на основе онтологии предметной области. По степени соответствия выставляется рейтинг, который и показывает степень близости смыслов запроса и документа. Для определения релевантности может использоваться заданный порог рейтинга, выше которого документ считается релевантным, ниже – нет. В более сложном случае, когда у пользователя есть ряд критериев, по которым он считает документ подходящим или, наоборот, неподходящим, используется ряд запросов, соответствующих каждому из критериев, и решение принимается по интегральному показателю, являющемуся линейной функцией от значений рейтингов всех критериев.



Р и с. 5. Анализ результатов на основе семантики документов и онтологии предметной области

Для каждого из выбранных документов провести анализ, который покажет, по какой причине было принято решение об их семантической близости запросу. При просмотре семантического дескриптора другим цветом выделена часть, которая была признана наиболее близкой к дескриптору запроса (напомним, что сравнение производится не точное, а нечеткое, на основе онтологии). Далее в теле документа можно видеть, какой именно текст послужил основой для этой части семантического дескриптора, и видно, что реальный текст на естественном языке и несет тот смысл, поиск которого осуществлялся в запросе. Например, на рис. 5 приведена ситуация, когда по приведенному выше запросу мы нашли сайт, в котором, согласно семантическому дескриптору, говорится о создании мини-спутника дисковой формы, разработанной учебным заведением, но это Бостонский университет – т.е. он не находится в Европе, и миссия спутника – space physics (Earth upper atmospheric studies), т.е. научные исследования. Поэтому документ получил не высший рейтинг и находится в середине списка релевантных. Также в семантическом дескрипторе документа и в самом тексте обведены кругами места, которые соответствуют семантическому дескриптору поискового запроса, чтобы удостовериться, что и в документе действительно говорится об интересующей нас информации.

Оценка эффективности системы

Общая методика проверки качества отбора релевантных документов \ сайтов заключалась в следующем. В качестве эксперимента был сформирован ряд типовых многокритериальных запросов к поисковым системам в рамках интересующей предметной области. Примерами таких запросов были: а – «тип используемого источника питания в МКА от 2005-2007 гг.», б – «последние мини-МКА, выпущенные Китаем», в – «Все нано-спутники, заказанные НАСА», г – «Микро-МКА, предназначенные для океанографии и имеющие параболическую орбиту» и д – «Мини-спутники, разработанные для коммерческого использования научными организациями Европы и имеющие форму диска».

Далее по каждому из запросов в поисковых системах строилось несколько различных запросов – ключевых слов к поисковым системам. По итогам запросов получались 100 лучших документов, которые импортировались в метапоисковую систему. Эти документы анализировались с помощью разработанной программы, которая предлагала свой вариант порядка данных документов по степени соответствия запросу и в соответствии с заданным порогом допустимости разделяла документы на релевантные и нерелевантные. Одновременно эти документы анализировались человеком-экспертом, незнакомым с результатами программы, и он предлагал свой вариант упорядочивания и разделения (в случае, когда нельзя четко утверждать, относится ли данный документ к требуемому запросу, выставлялось значение «нейтральный»).

В процессе каждого из запросов сравнивался предложенный порядок всех 100 документов для поисковой системы и разработанной системы относительно варианта человека-эксперта. Также сравнивалось качество отбора релевантных и нерелевантных статей (для поисковых систем отбиралось первое число ре-

зультатов, равное числу документов, признанных релевантными экспертом). Результаты анализа приведены в табл. 1 и 2.

Если посмотреть результаты анализа, то, во-первых, видно, что по мере возрастания сложности запросы выстроились как в, б, г, а, д, что ожидаемо – чем больше критериев в запросе, тем хуже результаты, возвращаемые поисковыми машинами (например, в самом сложном запросе д необходимо было учесть одновременно шесть критериев поиска). Обращают на себя внимание две тенденции: чем сложнее запрос, тем хуже результаты у обеих систем, но при этом тем больше разрыв в качестве между традиционными поисковыми системами и разработанной метапоисковой системой, основанной на онтологии предметной области, причем на большей выборке он даже еще более представителен, чем на первой десятке. Это тоже полностью подтверждает нашу гипотезу – в более сложных поисковых конструкциях учет семантики выходит на первый план. Метапоисковая система показала также хорошее качество выявления релевантных результатов – в случае быстрого поиска (т.е. просмотра первых значений) предлагалось порядка 73% от наилучшего результата (который достижим только при просмотре полного набора документов), при этом при понижении порога включалось уже 88% релевантных документов (разумеется, за счет нарастания шума). Данные результаты показывают, что система позволяет существенно сократить скорость анализа набора документов выбранной предметной области и обеспечить качественный результат поиска и анализа.

Т а б л и ц а 1

Качество упорядочивания результатов для тестовых запросов

Запросы	Результаты поисковой системы (100 документов), %	Результаты метапоисковой системы (100 документов), %	Результаты поисковой системы (первые 10 документов), %	Результаты метапоисковой системы (первые 10 документов), %
а	26	68	46	82
б	34	72	61	91
в	39	77	67	94
г	30	71	63	86
д	21	62	32	79

Т а б л и ц а 2

Качество выявления релевантных результатов для тестовых запросов

Запросы	Анализ человека-эксперта – эталон	Результаты поисковой системы (порог 75%)	Результаты метапоисковой системы (порог 75%)	Результаты поисковой системы (порог 90%)	Результаты метапоисковой системы (порог 90%)
а	17 (100%)	10 (59%)	14 (82%)	7 (41%)	11 (65%)
б	51 (100%)	37 (73%)	45 (88%)	33 (65%)	39 (76%)
в	73 (100%)	60 (82%)	69 (95%)	51 (70%)	58 (79%)
г	38 (100%)	29 (76%)	35 (92%)	23 (61%)	30 (79%)
д	12 (100%)	5 (42%)	10 (83%)	3 (25%)	8 (67%)

Общее заключение на основе ряда экспериментов состоит в том, что во всех исследованных примерах разработанная система позволяла существенно улучшить результаты с точки зрения семантики сайтов \ документов, интересующих пользователя, четко разделяла релевантные и нерелевантные сайты и даже корректно упорядочивала релевантные сайты по степени соответствия пользовательскому запросу.

Данная система однозначно рекомендуется для подобных исследований экспертов, так как позволяет для предметной области, описанной онтологией, многократно повысить релевантность результатов при поиске интересующей информации, существенно экономя временные ресурсы.

Основные результаты и перспективы развития

Разработанная метапоисковая система, примененная для задачи мониторинга информации в области малых космических аппаратов, применима в любой предметной области, которая оперирует профессиональными знаниями, характеризующимися четкостью, логикой, ограниченным терминологическим запасом.

Каждому пользователю предоставляется возможность специфицировать интересующую его предметную область, формализуя имеющееся у него знание о предмете исследования, и анализировать документы с точки зрения этого знания, тем самым существенно повышая качество результатов, возвращаемых системами поиска в Интернет.

В рамках анализа качества результатов показано, что система способна разделять релевантные и нерелевантные сайты и корректно упорядочивать релевантные сайты по степени семантического соответствия пользовательскому запросу.

Разработанная система метапоиска позволяет решить актуальную задачу анализа и мониторинга информации в области малых космических аппаратов, являющуюся актуальным направлением работ российских конструкторских организаций.

Предлагаемая система, в которой сочетаются самые последние разработки в области систем понимания текста на естественном языке и извлечения знаний, является уникальным примером процесса интеграции знаний, ориентированным на конкретного пользователя, предоставляя механизмы для формализации и структурирования предметных областей, интеллектуального поиска, анализа и классификации сайтов и документов. В сочетании с предлагаемыми методами анализа и формирования знания, описанными в соответствующих главах, система способна решать основные проблемы, стоящие в текущий момент перед Интернет-сообществом, и может служить основой для общеинтеграционной платформы систематизации, обобщения и анализа научно-технических и производственных знаний в самых разных предметных областях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованев И.Н., Дубовой А.Н., Прямухин С.Б. От малых космических аппаратов к нанотехнологиям // "Двойные технологии". №2. 2005.
2. Андреев В., Виттих В., Батищев С., Ивкушкин К., Минаков И., Ржевский Г., Сафронов А., Скобелев П. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. №1. С. 126-137.
3. Андреев В.В., Ивкушкин К.В., Карягин Д.В., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О., Томин М.С. Разработка мультиагентной системы понимания текста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. III Междунар. конф. Самара, 4-9 сентября 2001. Самара: СНЦ РАН, 2001. С. 489-495.
4. Минаков И.А. Кластеризация неструктурированной информации, представленной в виде текстов на естественном языке // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. Самара: СамГТУ, 2006. Вып. 40. С. 15-22.
5. Вольман С.И., Минаков И.А., Томин М.С. Мультиагентная система интеллектуального анализа содержимого Интернет-страниц // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII Междунар. конф., Самара, 27 июня – 1 июля 2005. Самара: СНЦ РАН, 2005. С.403-408.
6. Андреев В., Гельфанд М., Ивкушкин К., Казаков А., Новичков П., Томин М., Вольман С., Минаков И., Скобелев П. Разработка мультиагентной системы интеллектуального поиска информации в области современных биотехнологий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IV Междунар. конф. Самара, 17-24 июня 2002. Самара: СНЦ РАН, 2002. С. 338-345.
7. Минаков И.А. Разработка автоматизированной системы построения онтологии предметной области на основе анализа текстов на естественном языке // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. Самара: СамГТУ. 2004. Вып. 20. С. 44-48.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2006 г.

УДК 681.5:621.315

В.Н. Митрошин, А.Ю. Лойко, Д.О. Сазонов, Е.В. Филиппова

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОЧЕРВЯЧНОГО ЭКСТРУДЕРА*

Решена задача структурного моделирования температурного поля расплава полимера в шнеке экструдера как функции пространственно-временного распределения температуры цилиндра экструдера. Это позволило получить структурную схему процесса как объекта управления с распределенными параметрами и синтезировать систему автоматического регулирования температурным распределением расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера.

Контроль температуры цилиндра и формирующего инструмента (кабельной головки) экструдера необходим для обеспечения постоянства вязкости полимера, а в случае наложения химически вспененной изоля-

* Работа поддержана грантом РФФИ (проект 06-08-00041-а)

ции – и для стабилизации степени разложения порофора. Отклонения вязкости материала могут привести к ухудшению его свойств, возникновению недопустимых нагрузок на шнеке и приводе экструдера.

Для обеспечения стабильности размеров формируемой кабельной изоляции и ее электрических свойств температура расплава полимера на выходе зоны дозирования и давление расплава в кабельной головке должны поддерживаться в узких пределах [1].

Температура формирующего инструмента обычно влияет только на качество поверхности изоляции, так как материал находится в кабельной головке в течение относительно короткого промежутка времени.

Теоретически регулирование температуры расплава полимера и его давления может выполняться путем изменения параметров в двух последних зонах нагрева цилиндра экструдера. Но значительные искажения температурного поля по длине цилиндра экструдера могут привести к негативным последствиям, таким как нарушение однородности материала и ухудшение качества поверхности [1]. В [2] отмечается, что заметное изменение производительности экструдера наблюдается только в том случае, когда изменение мощности на нагрев происходит в зоне загрузки. При изменениях мощности на нагрев в зонах, находящихся вблизи от конца шнека, производительность изменяется в пределах точности измерений, т.е. регулирование температуры расплава полимера в зонах вблизи от конца шнека не оказывает никакого влияния на производительность экструдера. Кроме того, отмечается, что в стационарном режиме работы экструдера наблюдается линейная зависимость изменения температуры расплава полимера ΔT_p от изменения мощности на нагрев $\Delta \tilde{P}_i$, подводимой к i -зоне цилиндра экструдера. Влияние подводимой мощности на нагрев тем сильнее, чем ближе к концу шнека находится рассматриваемая зона цилиндра экструдера.

Регулирование температуры расплава полимера на экструдерных прессах обычно осуществляется путем стабилизации температуры по зонам нагрева экструдера с управлением температурой последней зоны цилиндра экструдера [1, 2, 3, 4, 5].

Для построения системы автоматического регулирования температурой расплава полимера на выходе зоны дозирования экструдера необходимо тем или иным образом найти адекватную динамическую модель объекта управления. В подавляющем большинстве работ [2, 6, 7, 8] использовался метод экспериментального получения переходных характеристик объекта управления с их последующей идентификацией. В частности, в [8] объект регулирования, выходом которого является температура расплава полимера, а входом – мощность нагревательных элементов, описывается как апериодическое звено первого порядка, параметры которого – коэффициент передачи и постоянная времени – определены по экспериментально снятой переходной характеристике. Во всех известных работах данный объект управления рассматривается и описывается как объект управления с сосредоточенными параметрами. Существующая зависимость регулируемой величины – температуры расплава полимера от пространственных координат (в первую очередь, от продольной координаты шнека) игнорируется.

В [9] впервые получена и приведена передаточная функция $W(z, \xi, p)$ формируемого в выходной зоне одночервячного экструдера температурного поля расплава полимера как объекта управления с распределенными параметрами

$$W(z, \xi, p) = -\frac{1}{\bar{V}_z} \cdot 1(\xi - z) \cdot \exp \left[-\left(\frac{p}{\bar{V}_z} + \frac{\alpha + bK^*h}{\rho Ch\bar{V}_z} \right) \cdot (z - \xi) \right], \quad (1)$$

$$K^* = K \exp(bT_0), \quad (2)$$

$$K = \mu_0 \cdot \left(\frac{V_0}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \cdot \bar{B}^{\frac{n+1}{n}}. \quad (3)$$

Здесь \bar{V}_z – средняя скорость движения расплава полимера вдоль канала шнека; z – продольная координата шнека экструдера; y – координата по глубине канала шнека; ρ – плотность полимера; C – удельная теплоемкость полимера; h – глубина канала шнека экструдера; α – коэффициент теплоотдачи между полимером и цилиндром; b – температурный коэффициент вязкости; T_0 – температура приведения; μ_0 – ньютоновская вязкость полимера; n – индекс течения; V_0 – окружная скорость гребней винта шнека; \bar{B} – среднее значение коэффициентов B_y во всем диапазоне $0 \leq y \leq h$; ξ – входная пространственная координата.

$$B_y = \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2, \quad (4)$$

где v_x – циркуляционная скорость расплава полимера; v_z – поступательная скорость расплава полимера.

Передаточная функция (1) получена для объекта управления с распределенными параметрами (ОРП), описываемого линеаризованным уравнением теплопроводности [9]

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} + \bar{v}_z \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{\rho C} \cdot \left(bK^* + \frac{\alpha}{h} \right) \cdot T(z,t) = \frac{\alpha}{\rho Ch} [T_u(z,t)] + \frac{K^*}{\rho C}, \quad (5)$$

$$0 \leq z \leq L,$$

с краевыми условиями

$$T(z,0) = T^0(z), \quad T(0,t) = g_1(t), \quad T(L,t) = g_2(t). \quad (6)$$

Здесь T_u – температура цилиндра экструдера; L – общая длина экструдера вдоль канала шнека.

Стандартизирующая функция в задаче моделирования рассматриваемого линейного ОРП была определена в соответствии с методикой, предлагаемой в [10]. При этом решение краевой задачи (5), (6) представляется в виде

$$T(z,t) = \int_0^t \int_0^L G(z,\xi,t-\tau) w(\xi,\tau) d\xi d\tau =$$

$$= \int_0^t \int_0^L G(z,\xi,t-\tau) [\delta(\tau)T_0(\xi) + w_1(\xi,\tau) - w_0(\xi,\tau) + f(\xi,\tau,u(\xi,\tau))] d\xi d\tau. \quad (7)$$

Здесь $G(z,\xi,t-\tau)$ – функцией Грина краевой задачи, а

$$w_0(\xi,\tau) = -\bar{v}_z \delta(\xi) \cdot g_0(\tau), \quad (8)$$

$$w_1(\xi,\tau) = -\bar{v}_z \delta(\xi-L) \cdot g_1(\tau).$$

Тогда
$$w(\xi,\tau) = \delta(\tau)T_0(\xi) + \bar{v}_z [\delta(\xi) \cdot g_0(\tau) - \delta(\xi-L) \cdot g_1(\tau)] + \frac{\alpha}{\rho Ch} \cdot T_u(\xi,\tau). \quad (9)$$

В частных случаях, как у нас, стандартизирующую функцию можно представить в виде $w(\xi,\tau) = \varphi(\xi)v(\tau)$

при
$$\tilde{v}(p) = \tilde{T}_u(p), \quad \varphi(\xi) = f_1(\xi). \quad (10)$$

При сосредоточенном управлении по температуре $\tilde{T}_u(p)$ цилиндра экструдера, равномерно распределенной по длине зоны дозирования экструдера, передаточная функция x -блока, моделирующего свойства объекта по такому входу, представляют собой пространственную композицию [10]

$$W_x(z,p) = \tilde{G}^*(z,\xi,p) \otimes f_1(\xi), \quad (11)$$

где $\tilde{G}^*(z,\xi,p) = \frac{1}{b^*} \tilde{G}(z,\xi,p)$, $b^* = \frac{\rho Ch}{\alpha}$, $f_1(\xi) = 1$, и с учетом (1):

$$W_x(z,p) = \frac{\tilde{T}(z,p)}{\tilde{T}_u(p)} = \frac{1}{b^*} \int_0^L W(z,\xi,p) d\xi = \frac{1}{b^* \bar{v}_z} \int_0^z \exp \left[- \left(\frac{p}{\bar{v}_z} + \frac{\alpha + bK^*h}{\rho Ch \bar{v}_z} \right) \cdot (z - \xi) \right] d\xi =$$

$$= \frac{1}{b^* \bar{v}_z} \int_0^z \exp \left[- \left(\frac{p + K_1}{\bar{v}_z} \right) \cdot (z - \xi) \right] d\xi = \frac{1}{b^* (p + K_1)} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{(p + K_1)z}{\bar{v}_z} \right) \right], \quad (12)$$

где
$$K_1 = \frac{\alpha + bK^*h}{\rho Ch}. \quad (13)$$

Выражение (12) можно представить в виде

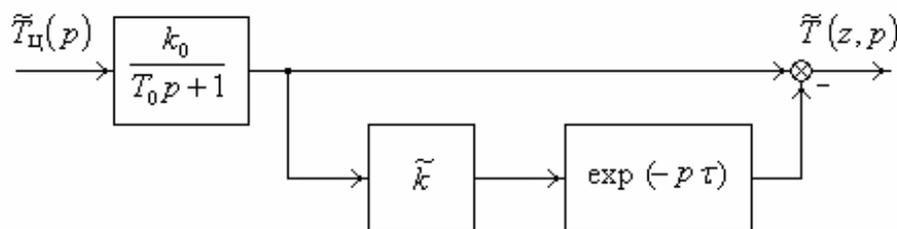
$$W_x(z,p) = \frac{1}{b^* (p + K_1)} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{(p + K_1)z}{\bar{v}_z} \right) \right] = \frac{k_0}{T_0 p + 1} \left[1 - \exp \left(- \frac{K_1 z}{\bar{v}_z} \right) \cdot \exp \left(- \frac{z}{\bar{v}_z} p \right) \right]. \quad (14)$$

Как видно из (14), рассматриваемый объект первого порядка можно назвать конечно представимым [11], так как в структурном отношении он представляется соединением конечного числа типовых звеньев (в данном случае – всего трех): 1) апериодического с постоянной времени, равной “ $T_0 = 1/K_1$ ”, и коэффици-

ентом усиления “ $k_0 = \frac{1}{b^* K_1} = \frac{\alpha}{\alpha + b K^* h}$ ”; 2) статического с коэффициентом передачи $\tilde{k} = \exp\left(-\frac{K_1 z}{V_z}\right)$ и

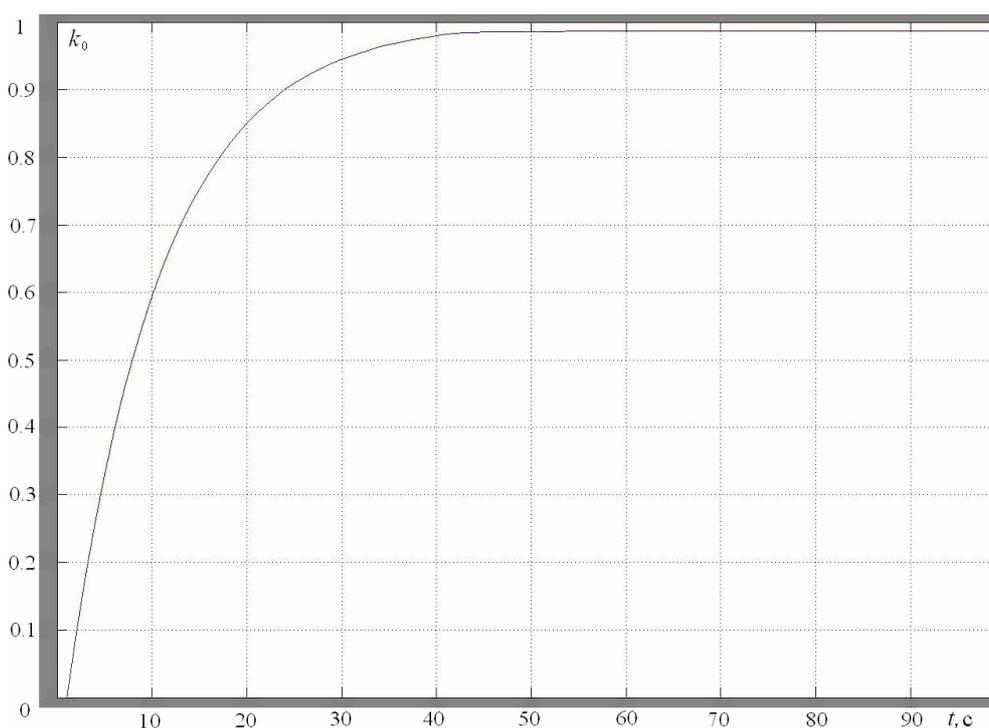
3) звена чистого запаздывания, равного времени $\tau = z/\bar{V}_z$ прохождения расплава полимера в канале шнека от входа в зону дозирования до местоположения, которое соответствует рассматриваемому значению продольной координаты z , определяемому местом измерения температуры расплава полимера (рис. 1).

Так как температура расплава полимера контролируется на выходе зоны дозирования экструдера для $z = L$, запаздывание $\tau = L/\bar{V}_z$ равно времени пребывания расплава полимера в зоне дозирования экструдера.



Р и с. 1. Структурное представление объекта управления процессом формирования расплава полимера в зоне дозирования пластицирующего экструдера с сосредоточенным входным воздействием по равномерно распределенной в зоне дозирования температуре нагревательных элементов

Для модели, представленной на рис. 1, расчетным путем в соответствии с полученным аналитическим описанием для зоны дозирования экструдера NOKIA-80 определены следующие параметры объекта: $k_0 = 1$, $T_0 = 10$ с, $\tau = 41,7$ с, $\tilde{k} = 0,01$.



Р и с. 2. Переходная характеристика модели конечно представимого объекта управления – температурного поля расплава полимера в выходной зоне червячного экструдера NOKIA-80

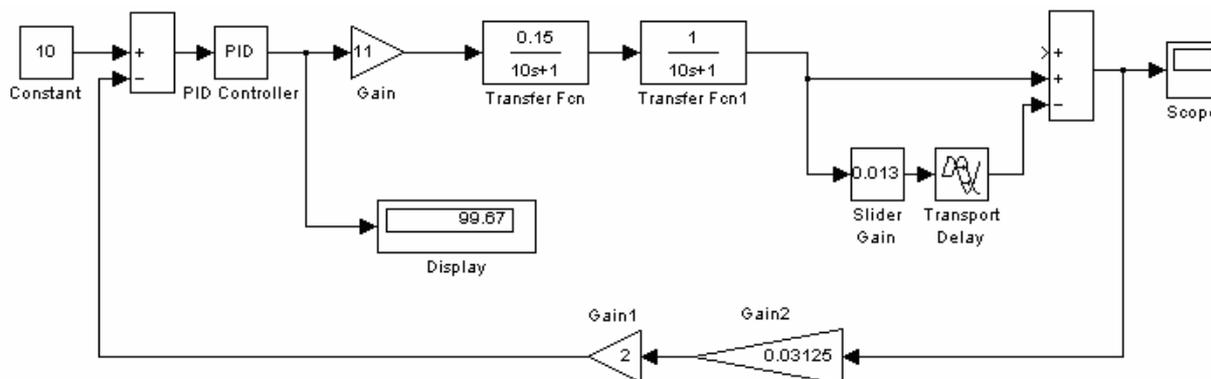
На рис. 2 приведена переходная характеристика рассматриваемого объекта управления, рассчитанная с использованием пакета *Matlab*.

На основе полученной структуры объекта управления была синтезирована САР температурного распределения расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера.

Температура расплава полимера контролируется на выходе зоны дозирования экструдера. Управление температурным полем полимера в зоне дозирования осуществляется по граничным условиям, т.е. изменением температуры нагревательных элементов последней зоны экструдера. Фактически мы имеем линейный распределенный объект с сосредоточенными входом и выходом. В качестве датчиков температуры в сис-

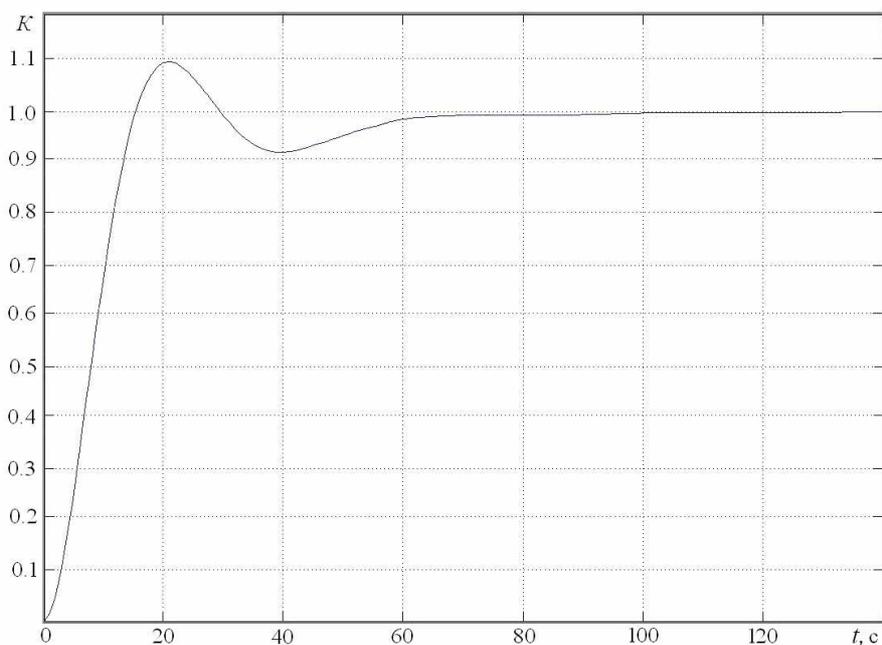
теме использовались активные датчики – термопары типа никель-хром/никель-алюминий либо железо/константан. Отличительной особенностью термопар является механическая прочность и высокая повторяемость результатов. Датчик температуры располагался в цилиндре как можно глубже, так как требуется измерять температуру расплава полимера, а не стенки цилиндра.

Анализ системы автоматического регулирования температуры расплава полимера был осуществлен с использованием пакета *Matlab Simulink*. Модель системы регулирования температуры расплава полимера приведена на рис. 3.



Р и с. 3. Модель САР температуры расплава полимера

Переходный процесс по управлению разработанной САР температуры расплава полимера показан на рис. 4.



Р и с. 4. Переходный процесс по управлению САР температуры расплава полимера

Из рис. 4 видно, что время переходного процесса составляет порядка 50 с. Максимальное перерегулирование равно 9%, что также является приемлемым результатом. Предлагаемая система регулирования температуры расплава полимера была внедрена на технологической линии наложения кабельной изоляции ME-125 фирмы *Maillefer* в ЗАО «Самарская кабельная компания».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Turnbull G.F.* Measurement and control of temperature. Dev. Plast. Technol. I., London, New York, 1982. P.1-43.
2. *Menges G., Meißner M.* Entwicklung von systemen zur massetemperatur – regelung am extruder. Plastverarbeiter, 1972. Jg.23. №4. P. 241-247.
3. *Ware W.* Control of plastic extruders with multiple temperature zones using a microprocessor based programmable controller system. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984. V. 20. №6. P. 912-917.
4. Control of plastic extruders with multiple temperature zones using a microprocessor based programmable controller system. – ISEEE Cont. Rec. of 35th Cont. El. Eng. Problems. 1983. P. 43-47.

5. *Bischoff W., Tessmer R., Kurz R.* Neue Antrieb- und Automatisierungslosungen fur Maschinen der Kabel und Drahtindustrie. *Elektrie*, 1987. Jg.41. № 4. P. 127-134.
6. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22. №1. P. 28-31.
7. *Laurich K., Muller G., Wallau H.* Automatisierungssystem fur kabelummantelungsanlagen. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22. №7. P. 370-374.
8. *Chan D., Lee L.J.* Dynamic modeling of a single screw plasticating extruder. ANTEC'84. 1984. P. 77-80.
9. *Митрошин В.Н.* Структурное моделирование температурного поля расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2006. Вып. 41. С. 191-194.
10. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2003. 299 с.
11. *Маковский В.А.* Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. М.: Металлургия, 1971. 384 с.

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2007 г.

УДК 681.3

Т.И. Михеева, О.Н. Сапрыкин

ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Описан подход к использованию нейросетевых технологий для решения аналитических задач в геоинформационных системах. Дано изложение некоторых из них и рассмотрены области применения. Представлен макет автоматизированной системы идентификации зависимостей в геоданных.

Введение

Нарастающие информационные потоки в современном обществе, разнообразие информационных технологий, повышение сложности решаемых на компьютере задач увеличивают нагрузку на пользователя и ставят задачу переноса проблемы выбора и принятия решений с человека на компьютерную систему обработки и анализа данных. Глубокий анализ данных позволит понять природу происходящих процессов, найти и изучить неочевидные зависимости между явлениями. Решение данных задач можно найти с помощью современной технологии *Data Mining* – интеллектуального анализа данных, исследования данных или, дословно, – «добычи данных».

Методы интеллектуального анализа данных существуют уже в течение продолжительного времени и лишь недавно были объединены в единое направление. В последние годы наблюдается тенденция применения средств искусственного интеллекта в методах *Data Mining* [1]. Методы искусственного интеллекта, основанные на нейронных сетях, обладают рядом качеств, выгодно отличающих их от других методов. Среди достоинств можно выделить низкую требовательность к входному набору данных и независимость времени работы от объема данных.

Большую практическую пользу приносит исследование данных в географических информационных системах (ГИС) [2]. ГИС объединяют в себе возможность работы с базами данных и удобную визуализацию данных в виде географической карты. Интеграция систем поддержки принятия решений, базирующихся на ГИС, с методами исследования данных повышает ценность географической информации [3]. С помощью средств *Data Mining* можно значительно расширить круг решаемых задач, включив в них следующие:

- обработка видеоизображений;
- преобразование растровых изображений в векторные графические модели;
- обработка картографической информации;
- обработка разнородной информации;
- построение моделей объектов или местности;
- анализ моделей ГИС;
- получение новых знаний;
- принятие решений на основе геоинформации.

Решение этих задач принесет значительный экономический эффект.

ГИС являются хорошей средой для внедрения методов искусственного интеллекта и экспертных систем. Это вызвано, с одной стороны, разнообразием и сложностью данных в ГИС, с другой — наличием большого числа аналитических задач при использовании ГИС.

Интеллектуальный анализ данных

По степени «интеллектуальности» обработки данных в аналитических системах выделяют следующие наборы функций:

- *информационно-поисковые* – осуществляют поиск необходимых данных, характерной чертой такого анализа является выполнение заранее определенных запросов;
- *оперативно-аналитические* – производят группировку и обобщение данных в любом необходимом аналитику виде, в отличие от информационно-поискового анализа в данном случае невозможно заранее предсказать необходимые запросы;
- *интеллектуальные* – осуществляют поиск функциональных и логических закономерностей в накопленных данных, построение моделей и правил, которые объясняют найденные закономерности и/или (с определенной вероятностью) прогнозируют развитие некоторых процессов.

В зависимости от поставленной перед системой задачей она может включать только один класс функций или все классы в той или иной мере.

Информационно-поисковая функциональность строится на основе реляционных систем управления базами данных. Основным инструментом здесь является структурированный язык запросов *SQL (Structured Query Language)*. Набор запросов является постоянным, а сами запросы - статическими. При использовании в системах функций только данного класса не приобретается новых знаний об объекте, но имеется возможность рассматривать его по частям, с разных точек зрения.

Функциональность *оперативно-аналитического анализа*, или *OLAP (On-Line Analytical Processing)*, использует методы и средства для сбора, хранения и анализа многомерных данных в целях поддержки процессов принятия решений. В *OLAP* данные агрегируются, предоставляя аналитику любую степень обобщения по любому набору информации. В отличие от информационно-поискового анализа технология *OLAP* позволяет обнаружить различного рода закономерности и тенденции в данных, которые иначе были бы не видны [4].

Средства информационно-поискового анализа предоставляют аналитику возможность оперативно-аналитического анализа – инструменты для проверки гипотез. При этом основной задачей аналитика является генерация гипотез. Он решает ее, основываясь на собственных знаниях и опыте. Знания есть не только у человека, они «скрыты» в гигабайтах и терабайтах накопленной в компьютере информации. Существует высокая вероятность пропустить гипотезы, которые могут принести значительную выгоду.

Для обнаружения скрытых знаний используются технологии *Data Mining* – исследование и обнаружение «машиной» (алгоритмами, средствами искусственного интеллекта) в «сырых» данных скрытых, ранее неизвестных, нетривиальных знаний, практически полезных и доступных для интерпретации человеком.

По способам решения задачи разделяют на *обучение с учителем SL (supervised learning)* и *обучение без учителя USL (unsupervised learning)*. В случае *SL* задача анализа данных решается в несколько этапов [5, 6]. Сначала с помощью какого-либо алгоритма *Data Mining* строится модель анализируемых данных – классификатор. Затем классификатор подвергается обучению, проверяется качество его работы и, если оно неудовлетворительно, происходит его дополнительное обучение. Так продолжается до тех пор, пока не будет достигнут требуемый уровень качества или не станет ясно, что выбранный алгоритм работает некорректно с данными либо сами данные не имеют структуры, которую можно выявить. К этому типу задач относят задачи классификации и регрессии. *USL* объединяет задачи, выявляющие описательные модели, например, закономерности в данных, расположенных на разных слоях электронной карты. Достоинством таких задач является возможность их решения без каких-либо предварительных знаний об анализируемых данных. К этому типу задач относятся кластеризация и поиск ассоциативных правил.

Использование технологии *Data Mining* для обнаружения знаний представляет собой сложную процедуру. Своей сложностью интеллектуальный анализ данных в значительной мере обязан трудностям организации данных, которые характерны для любых методик моделирования. Алгоритмы для интеллектуального анализа данных могут быть достаточно сложными, однако их применение благодаря современным технологиям значительно упростилось. Процесс обнаружения знаний можно разделить на следующие этапы.

1. Понимание и формулировка задачи анализа, уточнение целей, которые должны быть достигнуты методами *Data Mining*, определение способов оценки результатов исследования.
2. Препроцессинг - подготовка данных для автоматического анализа: форматирование и редактирование данных таким образом, чтобы к ним можно было применить конкретные методы интеллектуального анализа данных, определение коррелированности входных параметров, отсеивание неинформативных параметров и шумов в данных.
3. Применение различных методов *Data Mining*, включая их комбинацию, позволяющих проанализировать данные с нескольких точек зрения, построение моделей.

4. Проверка построенных моделей, при которой весь исследуемый массив данных разделяют на две неравные части: большая из них (обучающая) является исходным материалом для построения моделей методами *Data Mining*, а меньшая представляет собой тестовую группу, на которой проверяются полученные модели. Критерием, по которому оценивается модель, является разность в точности между группами.
5. Интерпретация человеком полученных моделей в целях их использования для принятия решений, добавление получившихся правил и зависимостей в базы знаний и т.д.

Система идентификации зависимостей в геоданных

В рамках интеллектуальной транспортной системы (ИТС) города [7, 8] разработана автоматизированная система идентификации зависимостей в географических данных. Система использует геоинформационные технологии, методы искусственного интеллекта и имеет средства интеграции с ИТС: общие структуры данных, интерфейсы, модули и т.д.

Основной модуль этой системы – модуль анализа состояния пространственно-координированных объектов. При его разработке было необходимо решить следующие задачи:

- определение методов интеграции пространственно-координированных данных и алгоритмов исследования данных;
- выбор и реализация метода построения прогнозирующей регрессионной модели;
- проведение анализа состояния пространственно-координированных данных по построенной регрессионной модели (прогноз неизвестных значений);
- реализация функций управления и визуализации результатов на электронной карте города.

Программный комплекс ИТС – это средства хранения и обработки информации. Средства хранения информации включают в себя ГИС, содержащую электронную карту, и базу данных с атрибутивной информацией. Средства обработки информации включают в себя системы моделирования поведения объектов транспортной инфраструктуры, экспертные системы принятия управленческих решений в вопросах организации и безопасности дорожного движения.

Автоматизированная система идентификации зависимостей в географических данных обеспечивает следующий набор функций:

- обучение системы на имеющихся в ГИС данных и построение аналитического выражения зависимости данных, находящихся на разных слоях электронной карты, в виде полинома;
- определение изменений в слоях карты при изменении данных в каком-либо одном из взаимосвязанных слоев;
- поиск объектов с похожей топологией в пределах одного слоя карты.

Основная решаемая в ГИС задача, на которой так или иначе базируются остальные, – это построение слоя. Она означает заполнение его недостающих частей или построение слоя полностью по информации, имеющейся в других слоях, на основе нахождения некоторой функциональной зависимости между параметрами, полученными эмпирическим путем, и скрытыми теоретическими параметрами, определяющими существенные характеристики каждого конкретного объекта. Процесс восстановления данных, восполнение пробелов в них осуществляется путем построения нового слоя по существующим слоям. При этом исследуется вопрос, какие данные (входные сигналы) являются доминирующими в процессе принятия нейросетью решения, а какие нет. В дальнейшем последовательно из рассмотрения убираются те слои, которые в наименьшей степени влияют на восстановление отсутствующей информации. Значимость слоя формируется из значимости его точек. Анализ значимости областей из слоев, участвующих в качестве входов, дает представление о территориальном распределении значимости.

Решение задачи обучения можно осуществить с помощью методов, позволяющих построить отношение регрессии между различными наборами данных. Среди этих методов можно выделить регрессионный анализ на основе метода наименьших квадратов (*МНК*), метода группового учета аргументов (*МГУА*), а также модифицированный *МГУА*, основанный на нейросетевых технологиях [9]. Нейронные сети претендуют на то, чтобы стать универсальным аппаратом, решающим разные специфические задачи из разных проблемных областей в ГИС. Такая универсальность обуславливается тем, что нейросети дают стандартный способ решения многих нестандартных задач. Возможно, что специализированная программа решает лучше какой-либо класс задач, однако намного важнее, что один нейроимитатор может решить задачу как данного, так и другого класса, при этом нет необходимости каждый раз создавать специализированные приложения для каждой специфической задачи.

При выборе метода *МГУА* учитывались следующие факторы, обнаруженные на стадии анализа:

- *зашумленность данных*. Это обусловлено, например, неточными координатами дорожно-транспортных происшествий, отсутствием необходимых данных о некоторых происшествиях, а также многими другими факторами;
- *корреляция входных данных*. При установке нового дорожного знака или светофорного объекта на улично-дорожную сеть города необходимо учитывать существующую ситуацию на данном участке дороги, влияние нового технического средства на автомобильные и пешеходные потоки, интенсивность движения, безопасность и др. Допустимое взаимное расположение различных технических средств организации дорожного движения определено ГОСТ 23457-86.

Ограничения, наложенные на использование *МНК*, не позволяют ему работать ни с зашумленными, ни с коррелированными данными. Алгоритмы *МГУА* способны справиться с обеими проблемами. Для достижения большей точности и расширения области регрессии множество переменных расширяется за счет множества выходных величин, получаемых по алгоритмам *МГУА*. На основе этого принципа строится нейронная сеть, называемая *МГУА-нейросетью*.

Сеть *МГУА* не похожа на обычные сети с прямой связью, и изначально эта архитектура не представлялась в виде сети. Сеть *МГУА* содержит в связях полиномиальные выражения и использует аналогичный генетическим алгоритмам механизм принятия решения о том, сколько слоев необходимо построить. Обученная нейронная сеть обладает возможностью представить выход как полиномиальную функцию всех или части входов [5, 6, 9].

При проектировании системы к созданию программных систем применялся компонентно-ориентированный подход, предполагающий разделение системы на ряд независимых модулей. Данный подход упрощает повторное использование модулей системы без их перекомпиляции, а также позволяет использовать модули других подсистем ИТС и модули третьих фирм.

Система идентификации зависимостей содержит модуль, ответственный за выполнение нейросетевых алгоритмов, – «*Нейросеть*», и модуль, выполняющий анализ географических данных, – «*Анализатор*». Модуль «*Нейросеть*» является библиотекой классов, в которой собраны алгоритмы работы с нейросетевыми структурами. Модуль «*Анализатор*» является более высокоуровневым и использует классы модуля «*Нейросеть*» для обработки геоданных.

На этапе анализа выяснено, что решение поставленных задач требует реализации нескольких видов нейронных сетей, что и было осуществлено в модуле «*Нейросеть*». С помощью таких механизмов объектно-ориентированной разработки приложений, как наследование и полиморфизм, а также применения паттернов проектирования (*Design Patterns*) конечное приложение гибко настраивается на использование того или иного типа сети. Паттерн – это именованная пара «проблема/решение», содержащая рекомендации для применения в различных конкретных ситуациях. Паттерн «стратегия» использован при реализации различных поведений активных нейронов в дважды многослойной нейронной сети. Используемый паттерн позволяет уменьшить число классов в иерархии путем выделения различных поведений в отдельную иерархию.

Одним из реализованных в рамках модуля «*Нейросеть*» алгоритмов является алгоритм обратного распространения ошибки (*Back Error Propagation Algorithms; BackProp*; алгоритм двойственного функционирования; *АДФ*). Это итеративный градиентный алгоритм обучения, который используется с целью минимизации среднеквадратического отклонения текущего выхода и желаемого выхода многослойных нейронных сетей. Это можно записать в следующем виде: $w := w - \eta E_k'(w)$, где w – вектор весов сети, $E_k'(w)$ – вектор градиента, η – некоторая константа – коэффициент скорости обучения. Особую трудность представляет выбор коэффициента η . При большом значении η сходимость будет более быстрой, но велика вероятность ошибочно принятого направления. Маленькое значение η гарантирует правильное направление, но скорость сходимости будет намного ниже [10]. Правильный выбор коэффициента скорости обучения зависит от конкретной задачи и определяется опытным путем, поэтому предусмотрена возможность настройки этого параметра извне. В модуле «*Нейросеть*» также реализованы сеть *МГУА* и сеть встречного распространения. Реализованы различные алгоритмы активных нейронов.

В модуле «*Анализатор*» сконцентрирована основная работа по анализу геоданных в целях поддержки принятия решения по установке объекта. Модуль «*Анализатор*» получает данные от подсистемы работы с базой данных и подсистемы работы с ГИС. Полученные данные используются для обучения нейронной сети одним из методов, реализованных в модуле «*Нейросеть*». Для обучения сети используются данные нескольких слоев карты, основными из которых являются дорожно-транспортные происшествия, светофоры и дорожные знаки. Дорожные знаки, расположенные на карте, имеют качественные характеристики, а алгоритмы обработки требуют количественных показателей. Поэтому для анализа слоя карты с дорожными знаками выбрана следующая схема кодирования:

- каждый тип знака выделяется в отдельный фактор;

- для количественной оценки расположения знака вычисляется степень близости данной точки плоскости к знаку. В точке (x, y) плоскости это значение для знаков i -того типа вычисляется по формуле

$$\varphi_i(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_{i,j}(x, y), \quad (1)$$

$$\text{где } g_{i,j}(x, y) = \begin{cases} 1, \text{ при } x_{i,j} = x; y_{i,j} = y, \\ \frac{1}{\sqrt{(x_{i,j} - x)^2 + (y_{i,j} - y)^2}}, \text{ иначе;} \end{cases}$$

N – число знаков данного вида;

$(x_{i,j}, y_{i,j})$ – координаты j -того знака i -того вида.

Метод группового учета аргументов

Для решения задачи поиска зависимости между слоями карты выбраны нейронные сети на основе МГУА (полиномиальные нейронные сети). Существует целый спектр методов МГУА. Выбор алгоритма зависит как от точности и полноты информации, представленной в выборке экспериментальных данных, так и от вида решаемой задачи. Все методы МГУА основаны на переборе - последовательном опробовании моделей, выбираемых из множества моделей-кандидатов по заданному критерию. Общая связь между входными и выходными переменными находится в виде функционального ряда Вольтерра, дискретный аналог которого известен как полином Колмогорова-Габора [9]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M a_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (2)$$

где $X(x_1, x_2, \dots, x_M)$ - вектор входных переменных; $A(a_1, a_2, \dots, a_M)$ - вектор коэффициентов слагаемых.

Будучи итерационным методом, МГУА близок к методу выбора лучшей регрессии, однако отличается от него целесообразной организацией поиска оптимальной структуры модели. Модели перебираются по группам или рядам равной сложности структуры и для каждого ряда находится лучшая по критерию модель. Теоретически доказано, что при зашумленных данных и короткой выборке минимум математического ожидания внешнего критерия единственен [10].

В индуктивных алгоритмах МГУА перебор моделей выполняется по внешним точностным критериям, причем результаты расчета критерия используются два раза: как для выбора лучших моделей каждого ряда, так и для объективного выбора числа рядов итерации. Наиболее часто используется критерий перекрестной проверки (*Cross Validation Criterion*) $PRR(s)$:

$$PRR(s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i(B))^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Матрица примеров для алгоритма разделена на две части: две трети составляют обучающую выборку, а одна треть – проверочную выборку. Обучающая выборка предназначена для определения коэффициентов полинома, а проверочная – для выбора оптимальной модели по выбранному критерию. Оптимальная, наиболее точная нефизическая модель, соответствует минимуму внешнего критерия. Алгоритм имеет многорядную итерационную структуру. Его особенность состоит в том, что правило итерации (частное описание) не остается постоянным, а расширяется с каждым новым рядом. Определение коэффициентов полинома происходит за несколько итераций. На рис. 1 изображена диаграмма потоков комбинаторного алгоритма.

На первом ряду перебору подлежат все модели простейшей структуры вида

$$y = a_0 + a_1 x_i, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

где M – число переменных. Выбирается некоторое количество $F < M$ лучших по критерию моделей.

На втором ряду перебираются модели более сложной структуры, построенные для выходных переменных лучших моделей первого ряда:

$$y = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j, \quad i = 1, 2, \dots, F; \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad F \leq M. \quad (5)$$

На третьем ряду перебору подлежат еще более сложные структуры вида

$$y = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_k, \quad i = 1, 2, \dots, F; \quad j = 1, 2, \dots, F; \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

и т.д. Нарастивание рядов продолжается до тех пор, пока снижается значение минимума критерия. При больших значениях «свободы выбора» $F=M$ алгоритм обеспечивает полный перебор всех моделей полиномиального вида.

В нейронных сетях *МГУА* используются нейроны, которые сами выбирают входные связи на основе собственных алгоритмов. Внешняя среда может только устанавливать ограничения на входные данные согласно критериям, используемым в нейронах. Такие нейроны называются активными нейронами, в отличие от пассивных нейронов, входные связи которых определены топологией сети. Выбор нейронной сети с активными нейронами также обусловлен присутствием шума в данных. Точность измерения величин влияет на число слоев активных нейронов. Чем больше дисперсия помех, тем больше слоев требуется сети для достижения заданной точности [10].

Число нейронов в каждом слое равно числу переменных. Первый ряд использует только входные переменные. Второй ряд – входные переменные и выходные значения первого слоя. Третий ряд использует входные переменные, а также выходные значения первого и второго слоев (рис. 1). При большом числе факторов используют метод сокращения числа переменных на входе слоя, исключая те, которые вызывают незначительное изменение выходной величины.

Реализация интеллектуальных методов в транспортной системе

Для решения задачи поиска похожих областей на карте использовалась сеть встречного распространения. Одной из основных характеристик нейронной сети данного типа является хорошая способность к обобщению. Данная особенность позволяет получить хорошие результаты даже при сильно зашумленных данных [10]. Такая схема кодирования имеет название принципа ближнего действия: чем ближе соседний узел к выходному узлу пространственно-временной решетки, тем больше его влияние на данный узел.

На рис. 2 показано, как можно изобразить расположение объектов на плоскости, где градиентом изображена близость к объекту (чем темнее, тем ближе точка плоскости к объекту), а изолиниями изображено распределение аварийности.

После того как данные закодированы, часть их поступает на вход полиномиальной нейронной сети с активными нейронами. При этом сеть обучается (самоорганизуется), и в результате получается модель, описывающая взаимосвязь нескольких слоев карты. После того как сеть обучена, ее можно использовать для рекомендаций пользователям, устанавливающим объект на карту города. Система сообщает пользователю, что с определенной степенью вероятности после установки объекта аварийность изменится на указанную величину. Если с большой степенью вероятности аварийность значительно упадет, то система советует сотруднику установить объект.

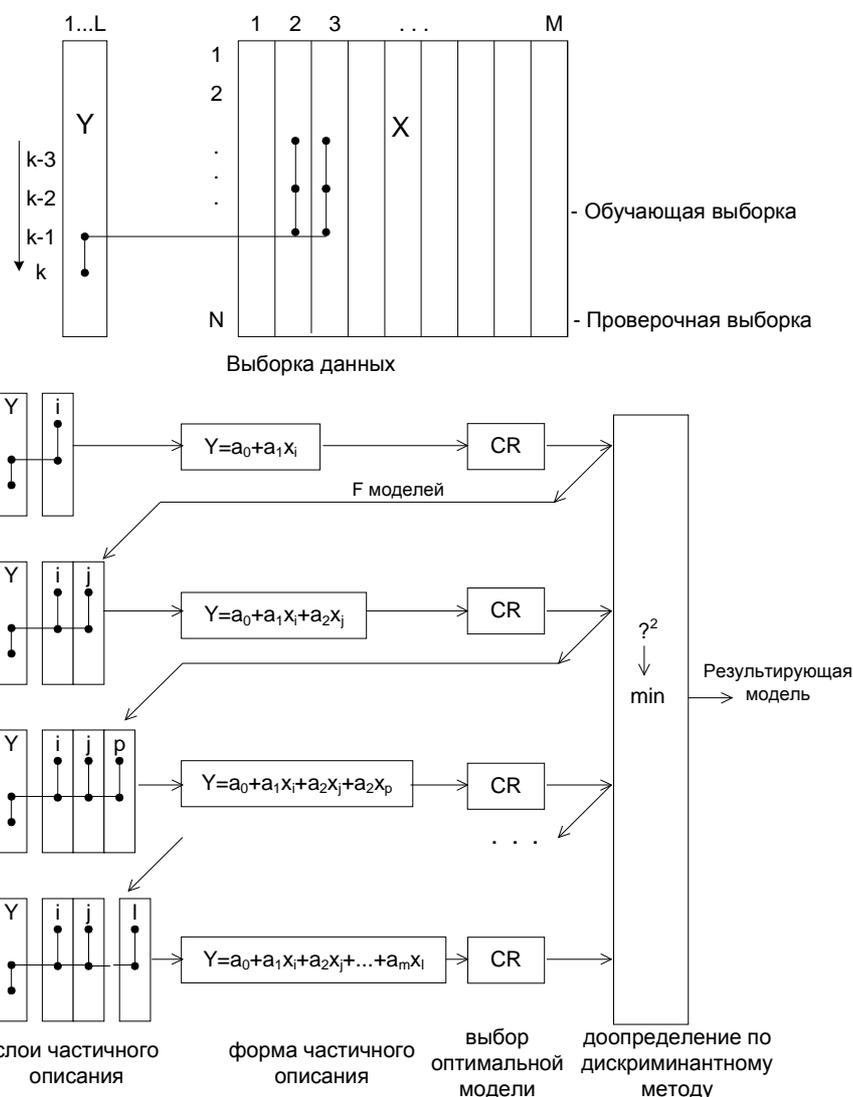


Рис. 1. Диаграмма потоков комбинаторного алгоритма

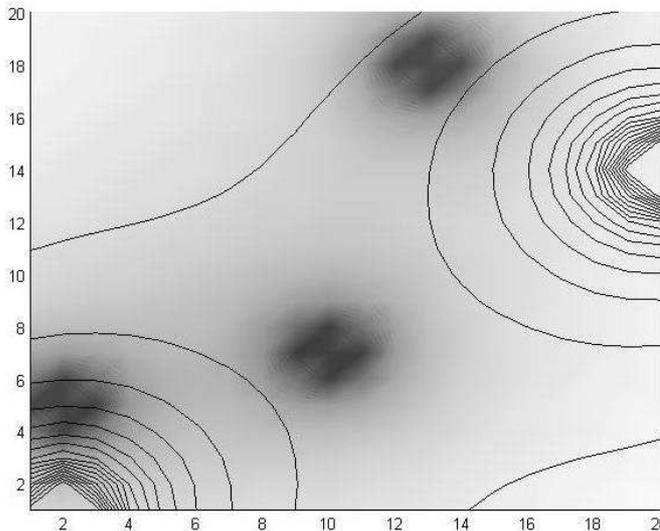


Рис. 2. Закодированный вид распределения точечных объектов на плоскости

Ниже представлен процесс построения прогнозирующей регрессионной модели.

Шаг 1. Пользователь выбирает исследуемые слои электронной карты, указывая поля с используемой для анализа атрибутивной информацией. Затем пользователь выбирает объекты на слоях, которые будут служить обучающей выборкой для алгоритма построения регрессионной модели. После этого пользователь инициирует процесс построения модели.

Шаг 2. Выбранные пользователем пространственно-координированные объекты проходят процесс препроцессинга в экземпляре класса *АдаптерКарты*. Трансформированные данные передаются в подсистему интеллектуального анализа, где итерационно строится дважды многослойная нейронная сеть.

Шаг 3. Числу слоев нейронной сети присваивается значение «1».

Шаг 4. Из поданной на вход обучающей выборки произвольно выбираются наборы переменных. Совокупность наборов переменных покрывают весь набор переменных поданных на вход.

Шаг 5. Для каждого набора переменных строится оптимальная многослойная архитектура нейрона по многослойному итерационному алгоритму. Каждый нейрон решает ту же задачу, что и вся сеть в целом, но на ограниченном наборе данных.

Шаг 6. Вычисляется внешний критерий по (3).

Шаг 7. Нейроны ранжируются по вычисленному критерию и выбирается L наилучших промежуточных переменных.

Шаг 8. Производится проверка: улучшилась ли средняя ошибка среди выбранных L моделей? Если улучшилась, то возможно, что на следующем шаге можно получить модель лучше, и поэтому построение модели продолжается. Если значение критерия ухудшилось или не изменилось, то переходим к шагу 11.

Шаг 9. В качестве входных переменных для следующей итерации берутся L переменных, полученных на данной итерации. Таким образом, на следующей итерации будет строиться регрессионная модель от переменных, полученных на текущей итерации, что увеличивает степень конечной полиномиальной функции.

Шаг 10. Увеличивается число слоев нейронной сети на «1». Повторяются шаги 4-8.

Шаг 11. Конструируется полная сеть. Строится полиномиальная модель по построенной нейронной сети.

Шаг 12. Результаты выводятся пользователю и модель сохраняется в файл.

Процесс расчета значений по регрессионной модели начинается с выбора пользователем слоя источника и объектов на нем. Пользователь загружает одну из сохраненных моделей. Выбранные пространственно-координированные объекты преобразуются с помощью адаптера и подаются на вход метода *Вычислить()* экземпляра класса *Полиномиальная Модель*. Вычисленные значения поступают в подсистему работы с пространственно-координированными данными. Они могут добавиться на существующий слой или на новый слой, в зависимости от выбранных пользователем настроек. Добавленные на карту данные немедленно отображаются в подсистеме управления и визуализации, и пользователи сразу видят результат расчетов.

Испытания разработанной системы проводились на реальных данных. Для этого взяты слои электронной карты г. Самары, содержащие дорожные знаки и уровень аварийности. Для анализа выбраны три перекрестка: Московское ш./XXI Партсъезда ул.; Московское ш./Нововокзальная ул.; Ново-Садовая ул./Советской Армии ул. Сравнение велось по внешнему критерию $PRR(S)$.

На рис. 3 изображена экранная форма системы идентификации зависимостей в географических данных для исследуемого перекрестка Ново-Садовая ул./Советской Армии ул.

По методу наименьших квадратов получена следующая функция:

$$z = 0.0509 \cdot 10^{-4} x_1 - 0.3706 \cdot 10^{-4} y_2 + 0.0521 \cdot 10^{-4} y_9 + 0.1569 \cdot 10^{-4} y_{10};$$

$$PRR(S) = 1.3226 \cdot 10^{-5}.$$

В многослойной нейронной сети с обратным распространением ошибки взято десять нейронов в скрытом слое. Весовые коэффициенты скрытого слоя приведены в таблице.

Весовые коэффициенты скрытых нейронов

w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	w ₆	w ₇	w ₈	w ₉	w ₁₀
-0.379	0.2158	-1.0041	-0.3533	1.1399	-0.095	1.3432	-0.0006	-0.8218	0.2087

$$PRR(S) = 4.4677 \cdot 10^{-7}.$$

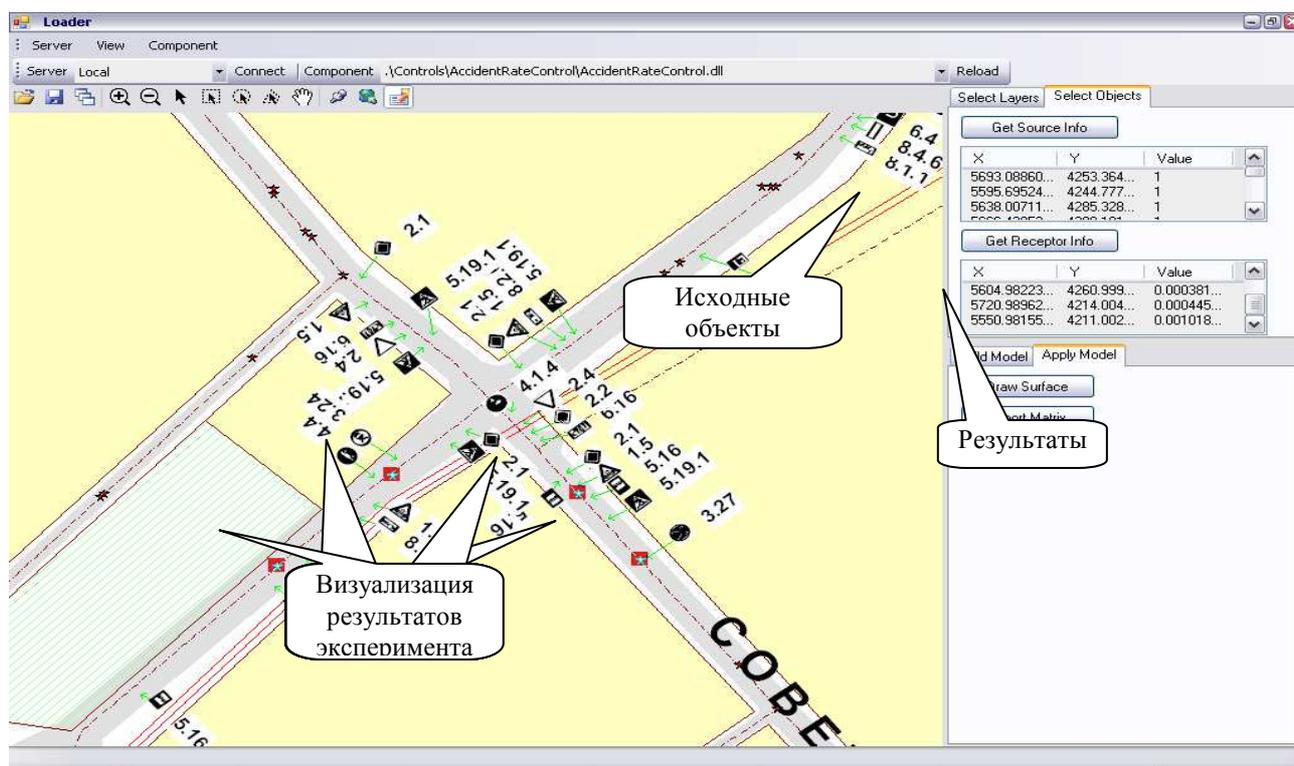
По методу дважды многослойной нейронной сети построена функция

$$z = 0.003928 + 4.291 \cdot 10^{-5} \cdot y_1 - 9.397 \cdot 10^{-7} \cdot y_1 \cdot x_3;$$

$$PRR(S) = 1.5904 \cdot 10^{-9}.$$

Автоматизированная система идентификации зависимостей в географических данных расширяется в следующих направлениях: реализации различных методов обучения нейросетей, использование различных архитектур нейросетей и расширение функциональности. Планируется решение других задач *Data Mining*,

таких как классификация и кластеризация. В качестве методов решения этих задач планируется применение нечетких множеств и отношений, генетических алгоритмов и нейронных сетей, а также современных модификаций указанных методов, связанных с их интеграцией. Это позволит более детально проводить анализ информационных систем, хранящих огромные массивы данных.



Р и с . 3. Экранная форма с отображением анализа результатов эксперимента

Применение системы в городских ИТС позволит более эффективно проводить мероприятия по снижению аварийности на улицах города. Это является высокоприоритетной задачей с учетом растущего с каждым годом числа транспортных средств и, как следствие, числа дорожно-транспортных происшествий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Nemati N.R., Barko C.D.* Organizational Data Mining: Leveraging Enterprise Data Resources for Optimal Performance.–Idea Group Publishing–2004. 371 с.
2. *Цветков В.Я.* Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.
3. *Михеева Т.И.* Data Mining в геоинформационных технологиях // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2006. №41. С. 96-99.
4. *Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В. и др.* Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
5. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
6. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.
7. *Михеева Т.И.* Применение инструментальных средств проектирования интеллектуальной транспортной системы // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: Тр. 6 междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург: С-ПбАДИ, 2004. С. 85-89.
8. *Михеева Т.И.* Построение математических моделей объектов улично-дорожной сети города с использованием геоинформационных технологий // Информационные технологии. 2006. №1. С.69–75.
9. *Официальный сайт метода МГУА* <http://www.gmdh.net>
10. *Ivakhnenko G.A.* An Analogues Complexing Algorithm for Self-Organization of Double-Multilayer Neural Networks. // USiM – 2003. №2. С. 100-106.

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2006 г.

Р.И. Муратов

АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И СИНТЕЗ РЕКОМЕНДАЦИЙ ЛПР ПО СЦЕНАРИЯМ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

Рассматриваются методы поддержки решений ЛПР при выборе предметно-ориентированных целей деятельности промышленного предприятия. Предлагаемые методы и подходы учитывают специфику отраслевого содержания предметной области и построены на теориях множеств, классификации, вероятности и математической статистики.

Введение

Для решения задач планирования деятельности промышленных предприятий ключевым моментом, определяющим успех его развития, является выбор «правильных» целей [1]. Трудность выбора цели [2] и способа её достижения состоит в том, что в современной практике крайне редко делают явный выбор конечных целей по причине полного или частичного отсутствия аргументов для оправдания выбора. Задача аргументации выбора конечных целей относится к задачам слабоструктурированным [3], в которых сочетаются количественные и качественные факторы [4], присутствует субъективное мнение и неполнота информации вследствие того, что описание предполагает физический сбор информации по наблюдению проявления того или иного фактора на длительных периодах, иногда до года.

Отсутствие единообразных подходов говорит о том, что в настоящее время не существует законченной теории по окончательному выбору правильных целей. На практике, как правило, цель ценится либо потому, что она имеет внутреннюю ценность, т.е. способна вызвать желание или одобрение со стороны ЛПР, либо она есть средство достижения более высокой цели. Поэтому предлагается исследовать такой подход [3], когда лицу, принимающему решения (ЛПР), или группе таких лиц предлагается рассмотреть варианты альтернативных решений, сравнить их и сделать выбор. Здесь СППР функционально отвечает только за задачу формирования поля альтернативных решений и за задачу подготовки списка критериев оптимальности, но не отвечает за окончательный выбор и принятие решения [2]. В целом актуальность исследуемой проблемы определяется ценой, которую придется платить предприятию за недостаточно обоснованное или ошибочно принятое решение. Для ЛПР это будет означать вариант «выбрал не ту цель, решил не ту задачу, потратил ресурсы предприятия».

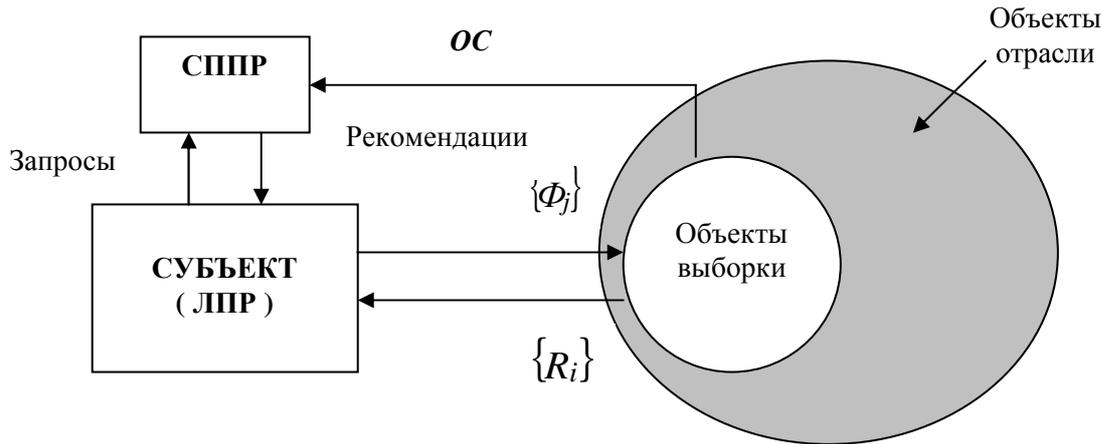
Постановка задачи

Пусть в рамках предметной области P субъект и объекты управления связаны схемой управления [5], приведенной на рис. 1, где ОС – специально организованная (вторая) обратная связь для наблюдения за признаками поведения объектов. ОС реализована средствами СППР; $\{\phi_j\}$ – факторы воздействия или поведения субъекта в соответствии с принятыми решениями ЛПР по стратегиям поведения, системе предпочтения и системе привлекательности объектов; $\{R_i\}$ – реакция объектов на воздействие, или первая обратная связь. Множество всех объектов представлено множеством промышленных предприятий выбранной отрасли одного региона. В дальнейшем это множество именуется множеством объектов генеральной совокупности (ГС) размерностью N , $\{O_{zc}\} = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$, для всех $O_i \in P$, при этом $O_{zc} \subset P$, где P – универсум. Для управления целенаправленно выбрана часть объектов ГС, представляющих множество объектов выборки размерностью n , $\{O_\varepsilon\} = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$, для всех $O_j \in P$, при этом $O_\varepsilon \subset O_{zc}$, $O_\varepsilon \subset P$. Средствами СППР организовано наблюдение за признаками поведения объектов. При этом признак поведения за i -тым объектом рассматривается как случайная величина X_i . Количество наблюдаемых случайных величин равно количеству объектов наблюдения. Результаты наблюдения за объектами или множество значений случайных величин $\{x_{ij}\}$ упорядочены и представлены в виде матрицы наблюдения, где i – номер объекта наблюдения или номер случайной величины X_i , а j – номер наблюдения.

В качестве стратегии управления принята стратегия условного «захвата» объектов по целям. Это означает, что ЛПР должен принять такие подцели управления, которые полностью совпадают с целями объектов ГС, т.е. с момента принятия таких целей ЛПР начинает преследовать цели объектов и тем самым консолидируется с ним в решении задач объектов. Консолидация, или объединение, и означает захват объекта по целям.

Таким образом, для решения исследуемой проблемы предлагается решить задачу в следующей поста-

новке: «Разработать методы анализа поведения объектов и синтеза соответствующих рекомендаций для ЛПР по целям планирования деятельности в виде поля альтернативных решений».



Р и с. 1. Схема управления объектами с участием СППР

Для решения данной задачи предлагается схема, приведенная на рис. 2. В соответствии с данной схемой анализ признаков поведения объектов выборки построен на методах классификации и на моделях измерения параметров активности поведения, предпочтения и привлекательности объектов ГС с интервальной оценкой надежности и точности полученных распределений. В рамках данной статьи приводится изложение решения только одной из трех задач - анализ характеристик активности поведения ОБ.

Построение классификации признаков активности поведения. Для решения данной задачи используем иерархическую классификацию [6].

В результате исследования предметной области [7] было установлено, что в качестве признака наблюдения активности поведения объекта следует выбрать показатель объема потребления отраслевого ресурса V_z в натуральных единицах на периоде времени наблюдения, составляющем год, $V_z \subset P$, где P – универсум или множество предметной области. Первая декомпозиция по признаку сезонного фактора дает классификационное множество $\{V_z\} = \{v_1, v_2, \dots, v_t\}$, где $t = [1, 12]$, $v_t \in P$. Вторая декомпозиция по признаку характеристики распределений $F_i(t)$ значений признака активности поведения дает классификационное множество $F_i(t) = \{F_1(t), F_2(t), \dots, F_k(t)\}$, $i = [1, 5]$, $F_i(t) \in P$.

Разработка моделей активности поведения. Для анализа характеристик распределения значений признаков активности поведения объектов разработаны специальные параметры активности, или функции поведения объекта (ФПО), в виде следующих зависимостей.

Функция «Доля текущая», или функция отношения текущего объема потребления ресурса V_t объектом к его годовому объему потребления V_z :

$$F_1(t) = FD_t = V_t / V_z. \tag{1}$$

Функция «Доля к среднему», или функция отношения текущего объема потребления V_t объекта к его среднемесячному объему потребления V_c :

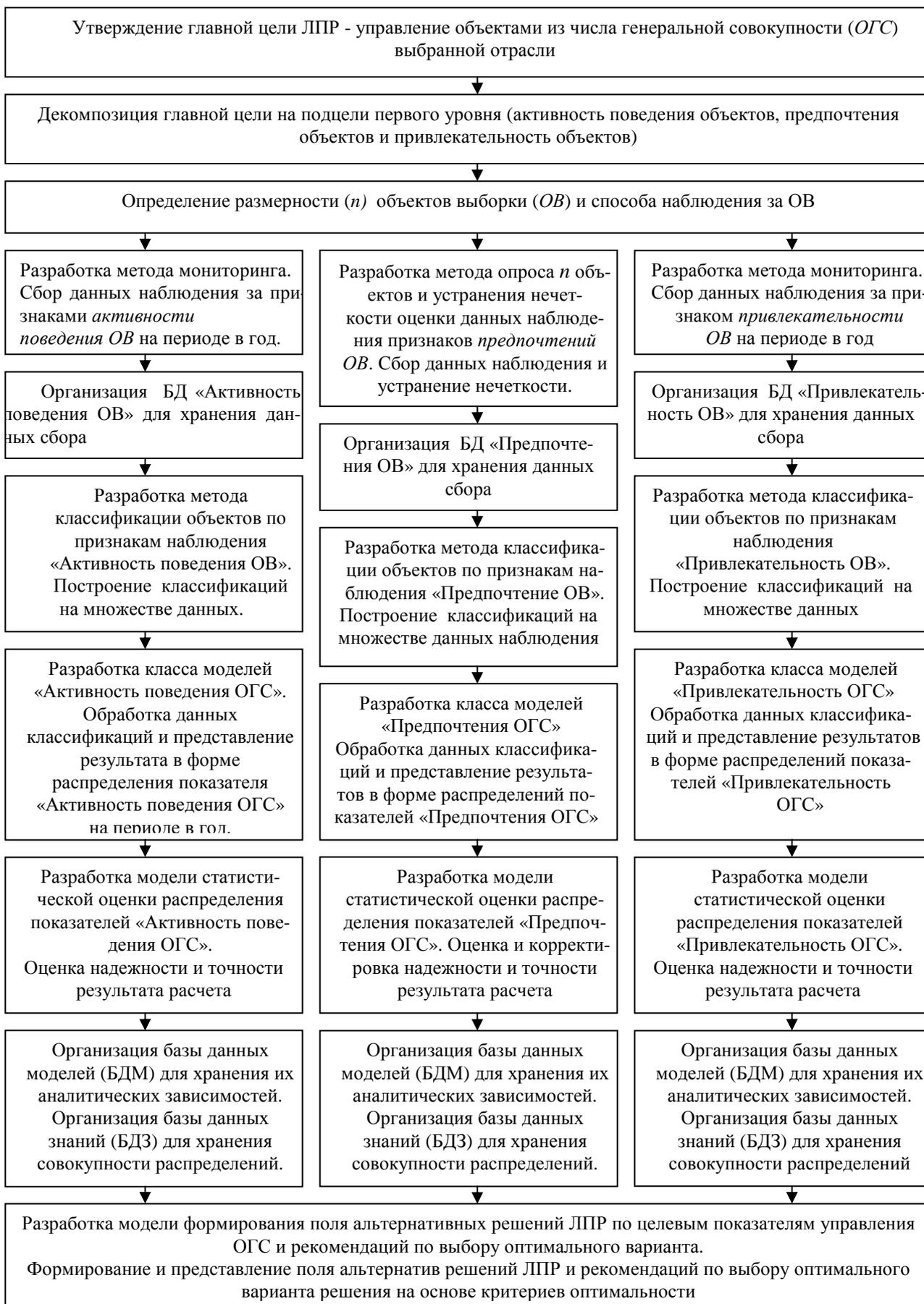
$$F_2(t) = FC_t = V_t / V_c = 12V_t / V_c = 12FD_t. \tag{2}$$

Функция «Доля накопленная», или функция накопленного объема потребления объекта с начала года до момента t к годовому объему потребления V_z :

$$F_3(t) = FH_t = \sum_{i=1}^t FD_i. \tag{3}$$

Функция «Тренд», или функция скорости изменения потребности в зависимости от времени t . Рассчитывается как отношение объема потребления текущего периода к объему потребления предыдущего периода

$$F_4(t) = FT_t = V_t / V_{t+1} = FD_t / FD_{t-1}. \tag{4}$$



Р и с. 2. Блок-схема анализа и синтеза поля альтернативных решений ЛПП

Функция «Знак», или функция знакового преобразования или квантования скорости изменения объема потребления в зависимости от времени – t . Принимает три значения: 1,0 и -1.

$$1, \text{ если } \left(\begin{matrix} F & D_t \\ / & F \\ F & D_{t-1} \end{matrix} -1 \right) > 0; \quad (5)$$

$$F_5(t) = F_3t = 0, \text{ если } \left(\begin{matrix} F & D_t \\ / & F \\ F & D_{t-1} \end{matrix} -1 \right) = 0; \quad (6)$$

$$-1, \text{ если } \left(\begin{matrix} F & D_t \\ / & F \\ F & D_{t-1} \end{matrix} -1 \right) < 0. \quad (7)$$

Разработка модели статистической оценки характеристик распределений на основе данных выборки. Разработка модели статистической оценки построена на двух утверждениях: «если наблюдаемые случайные величины одинаково распределены, то они имеют одинаковое математическое ожидание» и «выборочная средняя есть несмещенная оценка генеральной средней». Эти утверждения позволяют свести модель статистической оценки [8,9] к решению трех задач.

Задача 1. По данным наблюдения за параметрами активности объектов выборки выполнить расчеты значений выборочного среднего - \overline{V}_e , выборочной дисперсии - D_e и выборочного среднего квадратического отклонения - σ_e .

Алгоритм решения задачи

1. Находим суммы значений $\sum_{j=1}^{12} V_{ij}$ наблюдаемого признака V_{ij} по всем строкам и полученные значения фиксируем в последнем столбце табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Данные наблюдения признака активности ОБ

1	2	.....	J	.....	12	Итого
V_{11}	V_{12}	.....	V_{1j}	.....	V_{112}	$\sum_{j=1}^{12} V_{1j}$
.						
V_{i1}	V_{i2}	.....	V_{ij}	.....	V_{i12}	$\sum_{j=1}^{12} V_{ij}$
.						
V_{n1}	V_{n2}	.....	V_{nj}	.....	V_{n12}	$\sum_{j=1}^{12} V_{nj}$

2. Выполняем преобразование каждого значения наблюдаемого признака V_{ij} по формуле

$$K_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} V_{ij}}, \quad (8)$$

с обязательной проверкой условия нормировки. Результаты преобразования присваиваются коэффициентам K_{ij} и фиксируются в табл. 2. Коэффициент K_{ij} по смыслу соответствует функции $F D_t$ и является базовой функцией среди группы ФПО.

3. Находим суммы по столбцам или по j -выборке:

$$C_j = \sum_{i=1}^n K_{ij} \quad (9)$$

и фиксируем полученные значения в последней строке табл. 2.

4. Находим среднее по формуле

$$\overline{K_j} = \frac{C_j}{n}. \quad (10)$$

5. Находим дисперсию по формуле

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{ij} - \overline{K_j})^2}{n}. \quad (11)$$

6. Находим среднеквадратическое отклонение по формуле

$$\sigma_j = \sqrt{D_j}. \quad (12)$$

Т а б л и ц а 2

Данные расчета коэффициентов K_{ij}

1	2	.....	J	.....	12	Условие нормировки
K_{11}	K_{12}	.....	K_{1j}	.....	K_{112}	$\sum_{j=1}^n K_{1j} = 1$
K_{i1}	K_{i2}	.....	K_{ij}	.....	K_{i12}	$\sum_{j=1}^n K_{ij} = 1$
K_{n1}	K_{n2}	.....	K_{nj}	.....	K_{n12}	$\sum_{j=1}^n K_{nj} = 1$
$\sum_{i=1}^n K_{i1}$	$\sum_{i=1}^n K_{i2}$	.....	$\sum_{i=1}^n K_{ij}$	.....	$\sum_{i=1}^n K_{i12}$	

Задача 2. На основе данных n , $\overline{K_{zi}}$, D_j , σ_j построить интервальную оценку параметра активности поведения объектов генеральной совокупности в виде генерального среднего $\overline{K_{zi}}$ или его математического ожидания a с надежностью γ и с точностью δ .

Алгоритм решения задачи

1. Находим несмещенную оценку дисперсии по формуле

$$S_j^2 = \frac{n}{n-1} D_j. \quad (13)$$

2. Находим S_j по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma_j^2} = \sigma_j \sqrt{\frac{n}{n-1}}. \quad (14)$$

3. Введем на основе случайной величины K_j «новую» случайную величину T :

$$T = \frac{\overline{K_j} - a}{S_j / \sqrt{n}}, \quad (15)$$

которая имеет распределение Стьюдента с плотностью $S_j(t, n)$:

$$S_j(t, n) = B_n \left[1 + \frac{t^2}{n-1} \right]^{-\frac{n}{2}}, \quad (16)$$

где

$$B_n = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{\pi(n-1)} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}. \quad (17)$$

Поскольку $S_j(t, n)$ - четная функция от t , вероятность осуществления неравенства $\left| \frac{\bar{K}_j - a}{S_j / \sqrt{n}} \right| < \gamma$ опре-

деляется по следующей формуле:

$$P\left(\left|\frac{\bar{K}_j - a}{S_j / \sqrt{n}}\right| < t_\gamma\right) = 2 \int_0^{t_\gamma} S(t, n) dt = \gamma. \quad (18)$$

Преобразуем полученную формулу путем замены неравенства в круглых скобках на двойное неравенство к виду

$$P\left(X - t_\gamma S_j / \sqrt{n} < a < X + t_\gamma S_j / \sqrt{n}\right) = \gamma. \quad (19)$$

4. По заданным значениям n и γ , по таблице значений [8] в прил. 3, находим t_γ и рассчитываем доверительный интервал:

$$\left(\bar{K}_j - t_\gamma S_j / \sqrt{n} < \bar{K}_{\varepsilon_j} < \bar{K}_j + t_\gamma S_j / \sqrt{n}\right), \quad (20)$$

покрывающий неизвестный коэффициент силы воздействия j -того сезонного фактора на поведение объектов генеральной совокупности \bar{K}_{ε_j} с надежностью γ и с точностью

$$\delta = \frac{t_\gamma}{\sqrt{n}} S. \quad (21)$$

Задача 3. Требуется по данным n и D_j оценить неизвестное генеральное среднее квадратическое отклонение σ_{ε_j} с заданной надежностью γ .

Для этого приведем алгоритм построения доверительных интервалов, покрывающих параметр σ_j с заданной надежностью γ .

Алгоритм решения задачи

1. Находим несмещенную оценку дисперсии по формуле

$$S_j^2 = \frac{n}{n-1} D_j. \quad (22)$$

2. Находим «исправленное» среднее квадратическое отклонение по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma_j^2} = \sigma_j \sqrt{\frac{n}{n-1}}. \quad (23)$$

3. Запишем условие доверительного интервала:

$$P(S_j - \delta < \sigma_{\varepsilon_j} < S_j + \delta) = \gamma. \quad (24)$$

4. Введем переменную $q_j = \frac{\delta}{S_j}$ и доверительный интервал перепишем как

$$S_j(1 - q_j) < \sigma < S_j(1 + q_j). \quad (25)$$

5. Для вычисления q_j введем новую случайную величину χ («хи»), которая вычисляется по формуле

$$\chi_j = \frac{S_j}{\sigma_{\varepsilon_j}} \sqrt{n-1}. \quad (26)$$

Плотность распределения χ имеет вид

$$R(x, n) = \frac{x^{n-2} e^{-\frac{x^2}{2}}}{2^{\frac{n-3}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}. \quad (27)$$

Это распределение, как видно из полученной формулы, зависит только от n .

6. Преобразуем неравенство по п.4 в неравенство вида $\chi_1 < \chi_j < \chi_2$, тогда вероятность этого неравенства равна заданной вероятности γ , т.е.

$$\int_{x_1}^{x_2} R(\chi_j, n) d\chi = \gamma. \quad (28)$$

7. Найдем формулы для расчета границ интервала χ_1 и χ_2 . Для этого перепишем неравенство по п.4, полагая, что $q_j < 1$:

$$\frac{1}{S_j(1+q_j)} < \frac{1}{\sigma_j} < \frac{1}{S_j(1-q_j)}, \quad (29)$$

умножим все члены неравенства на $S_j\sqrt{n-1}$, получим

$$\frac{\sqrt{n-1}}{(1+q_j)} < \frac{S_j\sqrt{n-1}}{\sigma_j} < \frac{\sqrt{n-1}}{(1-q_j)} \quad \text{или} \quad \frac{\sqrt{n-1}}{(1+q_j)} < \chi_j < \frac{\sqrt{n-1}}{(1-q_j)}. \quad (30)$$

Вероятность осуществления этого неравенства составляет величину

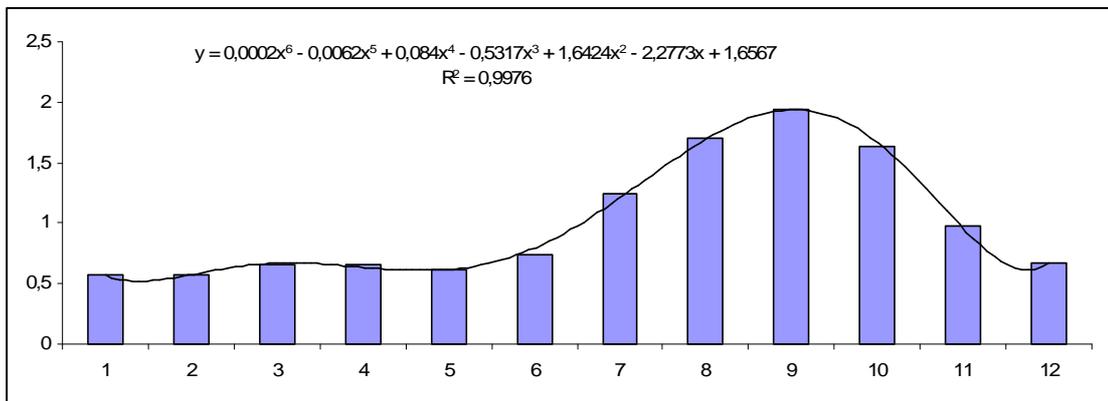
$$\frac{\int_{\frac{\sqrt{n-1}}{1+q}}^{\frac{\sqrt{n-1}}{1-q}} R(x, n) dx}{\int_{\frac{\sqrt{n-1}}{1+q}}^{\frac{\sqrt{n-1}}{1-q}} R(x, n) dx} = \gamma. \quad (31)$$

Из этого уравнения по заданным значениям n и γ можно найти q . Так как для отыскания q уже существуют готовые расчетные таблицы, то практической необходимости в расчете q по приведенному уравнению не существует. Для практических расчетов следует пользоваться расчетными таблицами, приведенными в различных источниках, например, в прил. 4 [8].

8. Найдем по таблице [8] в прил. 4 табличное значение q при заданной надежности γ , после чего построим доверительный интервал оценки генеральной средней квадратической отклонения

$$S_j(1 - q_j) < \sigma_{zj} < S_j(1 + q_j). \quad (32)$$

Формирование поля решений. Поле альтернативных решений ЛПР по целевым показателям управления ОГС строится на основе исследования и анализа данных распределений параметров активности поведения объектов, которые получены выше представленными методами классификаций и моделями активности поведения ОГС. На программном уровне отдельное распределение может быть задано как в аналитическом виде, так и в форме графика, в виде гистограммы или табличных значений. Пример многообразия форм представления результатов исследования активности ОГС по признаку $F_2(t)$ на периоде в год представлен на рис. 3. На рис. 4-7 представлены реальные распределения параметров активности ОГС, которые сопровождают поле принятия решений.

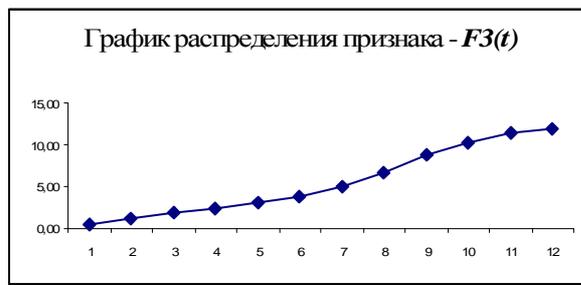


Р и с. 3. График распределения признака $F_2(t)$

Один из вариантов поля принятия решений ЛПР представлен на рис. 8. Данное поле принятия решений отражает активность поведения ОГС по отношению к видам потребляемого ресурса заданных структурой Р1-Р4 и к тенденции изменения объемов потребления ресурса на периоде в год. Как правило, критерием принятия решений ЛПР является максимизация результата при существующих ограничениях и рисках.



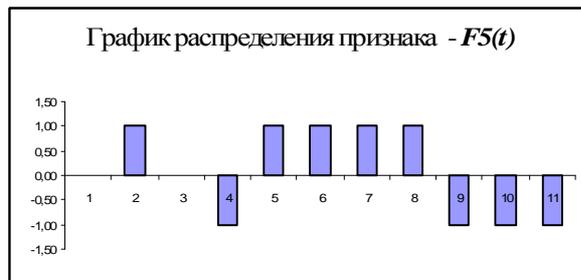
Р и с. 4



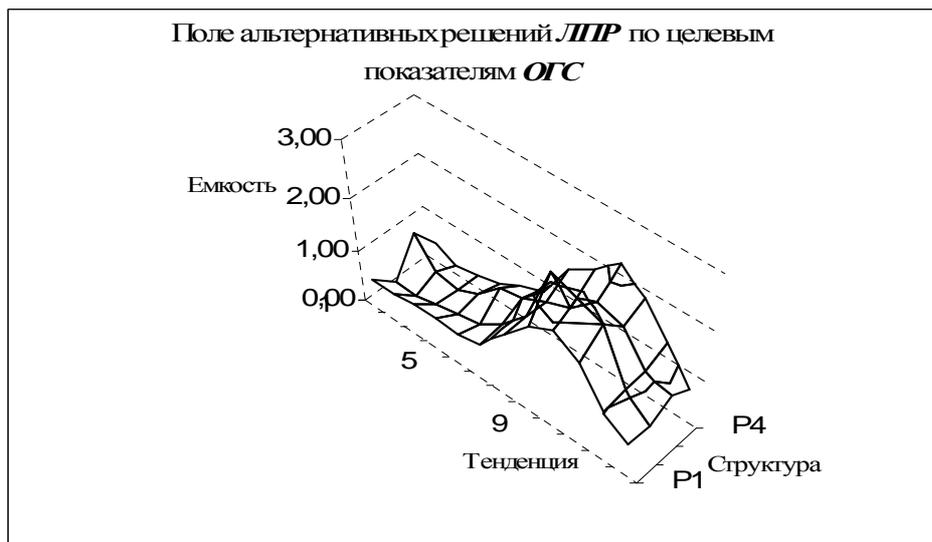
Р и с. 5



Р и с. 6



Р и с. 7



Р и с. 8. Поле альтернативных решений ЛПР

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муратов И.М., Муратов Р.И. Исследование предпочтений лиц, принимающих решение, по отношению к модели СППР в бизнес-системе // Матер. Международ. науч.-техн. конф., Самара, 2005.
2. Муратов И.М., Муратов Р.И. Концептуальный подход к анализу и синтезу систем поддержки и принятия решений // Тр. Всероссийск. межвуз. науч.-практ. конф., Самара, 2004.
3. Петровский А.Б. Компьютерная поддержка принятия решений: современное состояние и перспективы развития // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник / Под ред. Д.М. Гвишиани, В.Н.Садовского. №24. 1995-1996. М.: Эдиториал УРСС, 1996. С.146-178.
4. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. М.: Наука, 1996.
5. Муратов Р.И. Система поддержки и принятия решений в области маркетинга. // Тр. Всероссийск. межвуз. науч.-практ. конф., Самара, 2004.
6. Бугаев А.С., Петров М.И., Рекалов Д.В., Хельвас А.В, Шабунин В.М. Методы классификации объектов при создании информационных систем // Автоматизация проектирования. 1999. №2.
7. Муратов И.М., Муратов Р.И. Теория и практика маркетинговых исследований: Учеб. пособ. / Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2005. 62.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. 11-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2005. 479 с.: ил.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1958.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

Г.Н. Мятлов, А.А. Винокуров

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

Для подавления возмущающих воздействий, поступающих со стороны фундамента, предлагается использовать активную виброзащитную систему (АВЗС) с нейронной сетью в канале управления, обеспечивающую работу прецизионного испытательного стенда. Авторами предлагается заменить PID-регулятор оптимальной АВЗС на нейронную сеть таким образом, чтобы управление АВЗС было близко к оптимальному независимо от изменения параметров возмущающего воздействия. В связи с этим особое внимание уделяется обучающей выборке нейронной сети.

Возмущающие воздействия, поступающие со стороны фундамента, оказывают существенное влияние на точность и достоверность результатов, которые получаются в процессе испытаний изделий и экспериментов, проводимых на прецизионных испытательных стендах. Одним из эффективных способов виброзащиты стендов такого класса является использование активных виброзащитных систем (АВЗС) [1, 2].

Результаты экспериментальных исследований действия возмущений на стенды свидетельствуют о следующем. Возмущающие воздействия со стороны фундамента могут рассматриваться как стационарный нормальный случайный процесс. Корреляционная функция случайной составляющей возмущения может быть аппроксимирована экспоненциально-косинусной функцией, которой соответствует следующее нормированное выражение спектральной плотности мощности:

$$S_{\varphi}(\omega) = \frac{2\alpha}{\pi} \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2}{(\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2) - 4\beta^2\omega^2}, \quad (1)$$

где α – показатель затухания корреляционной функции;
 β – частота изменения корреляционной функции.

В то же время оценка характеристик возмущающего воздействия, проведенная в процессе работы испытательного стенда, показала, что показатель затухания и частота корреляционной функции могут изменяться во время испытаний [3].

Однако синтез и реализация АВЗС, независимо от метода испытаний, строятся для фиксированных параметров возмущающего воздействия [4,5]. Изменение параметров возмущающего воздействия приводит к ухудшению качества управления, что отражается на эффективности подавления возмущений и, как следствие, на точности получаемых экспериментальных данных.

Здесь предлагается использовать нейронную сеть (НС) для адаптивного управления АВЗС в процессе изменения спектра возмущения.

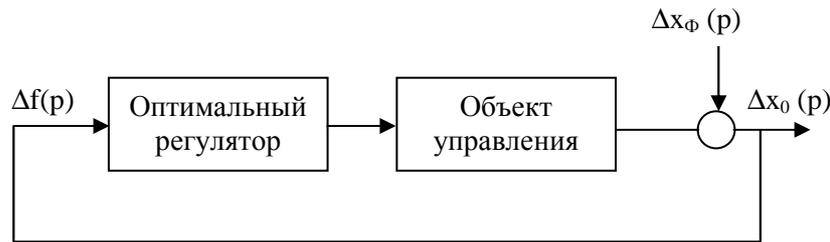
Для обучения НС использовался алгоритм обратного распространения ошибки (Back-propagation algorithm) в режиме off-line. Согласно правилам построения нейронной сети [6,7], обучаемой по закону «supervised training», необходимо на первом этапе создать массив данных для обучения НС. Для этого предварительно требуется синтезировать оптимальный регулятор, закон управления которого будет в дальнейшем взят за основу при синтезе управления АВЗС с нейросетью в канале управления. Данные для обучения могут быть получены путем моделирования работы оптимальной АВЗС в Matlab [8]. После завершения процесса обучения оптимальный регулятор будет заменен НС.

Важно акцентировать внимание на том факте, что вся информация, которая необходима НС для эффективного управления АВЗС и подавления возмущений при изменении его характеристик, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения сети напрямую зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу. В обучающую выборку должен входить массив данных, поступающих на вход регулятора, и соответствующий ему массив эталонных данных на выходе регулятора, учитывающих возможные изменения параметров возмущающего воздействия и объекта управления. В процессе обучения добиваются, чтобы реальный выходной сигнал НС соответствовал эталонному.

Поэтому первоначально необходимо синтезировать такую систему автоматического управления (САУ), которая обеспечивала бы наилучшие показатели качества работы АВЗС для определенных параметров возмущающего воздействия и объекта управления, работа регулятора которой в дальнейшем была бы принята за эталонную. В связи с этим рассмотрим следующие варианты построения АВЗС.

Оптимальная система активной виброзащиты

В общем случае при решении задачи оптимизации структурную схему исследуемой системы можно представить в виде, показанном на рис. 1.



Р и с. 1. Упрощенная структурная схема исследуемой оптимальной системы

Математическая модель объекта управления (ММ ОУ) принята в виде динамического звена второго порядка с передаточными функциями (ПФ):

по управляющему воздействию

$$W_{oy}^y(p) = \frac{\Delta z_0(p)}{\Delta f(p)} = \frac{K}{T^2 p + 2\zeta T p + 1};$$

по возмущающему воздействию со стороны фундамента

$$W_{oy}^e(p) = \frac{\Delta z_0(p)}{\Delta x_\phi(p)} = \frac{1}{T^2 p + 2\zeta T p + 1},$$

где p – оператор Лапласа; ΔZ_0 – перемещение несущей рамы испытательного комплекса; Δf – управляющее воздействие; Δx_ϕ – перемещение фундамента; T – постоянные времени пневмоопоры; ζ – коэффициент демпфирования.

В качестве критерия оптимизации для АВЗС целесообразно принять минимум среднего квадрата отклонения виброзащищаемого объекта $\langle x_0^2 \rangle$.

1. Активная виброзащитная система, синтезированная на основе традиционного подхода

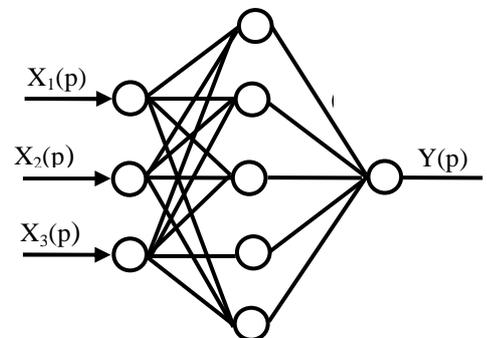
Рассмотрим вариант использования в качестве обучающей выборки для НС АВЗС синтезированную в предположении детерминированного характера возмущающего воздействия. В качестве оптимальной (базовой) настройки примем настройку [9], доставляющую минимум интегралу от квадрата ошибки:

$$\int_0^{\infty} [1 - x_0(t)]^2 dt.$$

Тогда регулятор АВЗС, синтезированный методом логарифмических частотных характеристик, принимает следующий вид:

$$W_{pez}(p) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_3}{a_0 p + a_1} = \frac{0,01 p^2 + 0,09 p + 1}{1,5 p + 1}.$$

Далее на модели АВЗС, синтезированной на основе базовой настройки и реализованной в среде Matlab, получим необходимый массив исходных входных и эталонных данных (реализаций), с использованием которых и проведем обучение НС [10]. Составным элементом НС является нейрон [6]. Будучи соединенными определенным образом, нейроны образуют НС. Нейросеть принято рассматривать как многослойную структуру. В данном случае предлагается использовать НС с тремя входными нейронами, одним скрытым слоем из пяти нейронов, и выходной слой из одного нейрона, как показано на рис. 2. Входные сигналы пропорциональны регулируемой координате $x(p)$ и первой ($x_1(p)$) и второй ($x_2(p)$) производным от нее соответственно. Выходной сигнал НС ($y(p)$) соответствует сигналу управления АВЗС.



Р и с. 2. Нейронная сеть

После завершения процесса обучения оптимальный регулятор заменен НС, как показано на рис.3. Сравнительные характеристики предложенной системы приведены на рис.4.

2. Активная виброзащитная система, синтезированная по методу Ю.П. Петрова

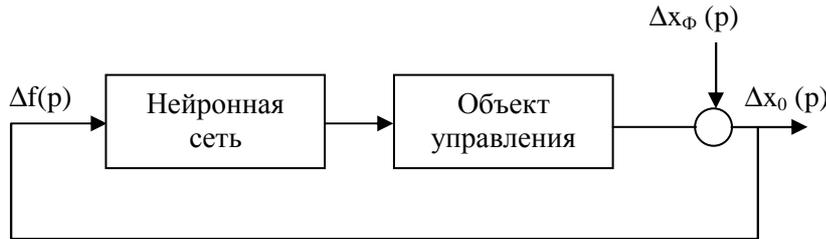
Метод синтеза систем автоматического управления (САУ) по среднему квадрату отклонения с учетом обеспечения устойчивости САУ и ограничения на мощность управления предложен в работах Ю.П. Петрова [11]. Критерий оптимизации записывается в виде

$$J = m^2 \langle x_0^2 \rangle + \langle u_0^2 \rangle,$$

где m^2 - неотрицательное значение множителя Лагранжа;

$\langle x_0^2 \rangle$ - средний квадрат отклонения выходной координаты;

$\langle u_0^2 \rangle$ - средний квадрат управляющего сигнала.



Р и с. 3. НС в канале управления АВЗС

С учетом изменений характеристик возмущающего воздействия (1) синтезирована на основе критерия (3) оптимальная АВЗС [12]. Синтезированный квазиоптимальный регулятор с усеченным полиномом числителя оптимальной АВЗС принимает следующий вид [13]:

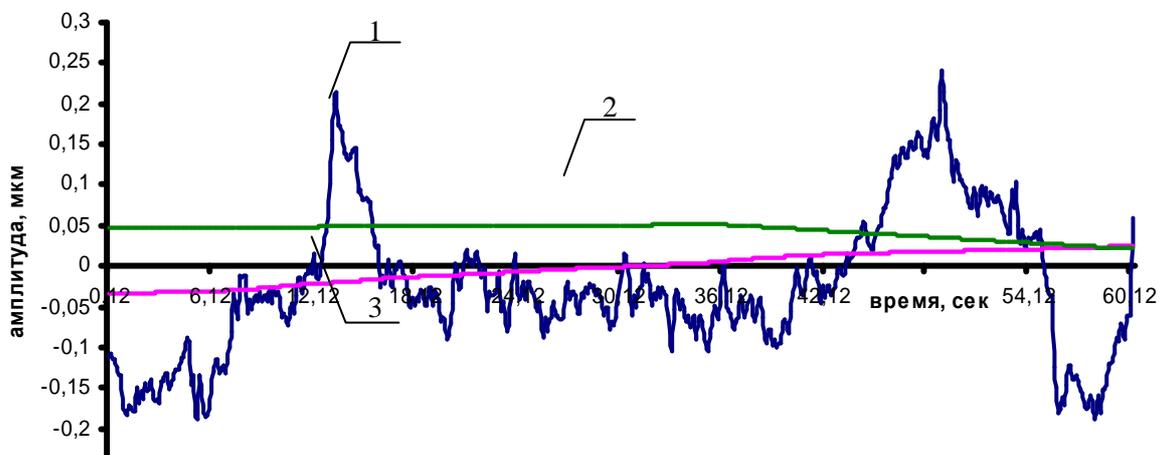
$$W_{pez}(p) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_3}{a_0 p + a_1} = \frac{1,804 p^2 + 4,82 p + 3,26}{0,167 p + 2,056}.$$

Входные и выходные параметры регулятора (4) использованы в качестве обучающей выборки для НС.

После завершения процесса обучения оптимальный регулятор заменен НС, как показано на рис.3. Сравнительные характеристики предложенной системы отражены на рис.4. Моделирование проведено в среде Matlab.

Сравнительный анализ работы НС в канале управления АВЗС, обученной на основе разных выборок

Результаты, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о следующем. Несмотря на то, что квазиоптимальная АВЗС позволяет снизить виброфон на несущих рамах испытательного стенда в 1,5-2 раза по сравнению с АВЗС, синтезированной традиционным методом [15], НС, примененная в канале управления, обеспечивает лучшие характеристики АВЗС.



Р и с. 4. Сравнение выходных характеристик АВЗС и АВЗС с НС:

1 - выходная координата квазиоптимальной АВЗС; 2 - выходная координата АВЗС с НС, обученной на основе выборки (2); 3 - выходная координата АВЗС с НС, обученной на основе выборки (4)

Как показывает анализ кривых 2 и 3 на рис.4, расхождение между выходной координатой АВЗС с НС, обученной на основе выборки (2), и выходной координатой АВЗС с НС, обученной на основе выборки (4), минимально.

Минимальное расхождение между кривыми получено за счет способности НС аппроксимировать функции по набору точек при условии создания обучающей выборки, содержащей реализации, наиболее полно описывающие решение поставленной задачи. В данном случае подразумевается реализация квазиоптимального закона управления, который в пределе обеспечивают регуляторы (2) и (4).

Таким образом, НС обеспечивает управление, близкое к оптимальному, независимо от обучающей выборки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. М.: Машиностроение, 1980. 131с.
2. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Наука, 1976. 320с.
3. Мятлов Г.Н. Математическая модель кинематических возмущений, действующих на прецизионный испытательный комплекс // Сб. науч. статей Севастопольского государственного технического ун-та. Севастополь. 1997. С. 85 - 89.
4. Колосов Г.Е. Синтез оптимальных автоматических систем при случайных возмущениях. М., 1984.
5. Петров Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при неполностью известных возмущающих силах. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 292 с.
6. Wasserman P. 1989 Neural computing, Theory and practice New York: VAN NOSTRAND REINHOLD.
7. Комарцова Л.Г., А.В. Максимов. Нейрокомпьютеры. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 400 с.
8. Мятлов Г.Н., Винокуров А.А. Моделирование работы активной виброзащитной системы в Matlab // Современные аспекты компьютерной интеграции машиностроительного производства: Матер. Всероссийск. науч.-практ. конф. Оренбург, 2003. С. 61-67.
9. Мятлов Г.Н. Сравнительный анализ качества переходных процессов при стандартных формах настройки систем автоматического регулирования // Тез. докл. науч. конф. Сызрань: СамГТУ, 1997. С. 43-45.
10. Мятлов Г.Н. Оптимальная активная виброзащита с нейронной сетью в системе управления // Сб. науч.-техн. статей по ракетно-космической тематике ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Самара, 2001.С. 67-72.
11. Абдулаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
12. Абакумов А.М., Мятлов Г.Н. Оптимизация системы активной виброзащиты с учетом характеристик возмущающего воздействия // Сб. науч. трудов. Магнитогорск, 1998. Вып. 4. С. 93-97.
13. Abakimov A.M., Miatov G.N. 2006 Journal "Sound and Vibration Research", Vol.289, Issues 4-5, p 889-907. Control algorithms for active vibration isolation systems subjected to random disturbances.
14. Мятлов Г.Н., Винокуров А.А. Оптимизация системы активной виброзащиты высокоточного измерительного комплекса // Вестник СамГТУ. Вып. 9. Самара: СамГТУ, 2005. С. 51-56.

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2007 г.

УДК 681.51

Г.Н. Розачев

ГИБРИДНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Рассматриваются вопросы использования гибридно-автоматного подхода к моделированию поведения различных систем управления. Построена модель системы автоматического управления процессом индукционного нагрева. Сформулирована задача верификации этой системы. Намечены пути решения задачи синтеза гибридно-автоматной САУ.

Универсальная гибридно-автоматная модель САУ [1] представляет собой простейший направленный граф (рис. 1). Вершина графа (состояние гибридного автомата) – это модель объекта управления, непрерывного физического процесса. Переходом моделируется работа контроллера. В соответствии с логикой работы системы управления задается условие перехода, инициирующее возможную смену сигнала управления, и действие перехода, заключающееся в вычислении управляющего сигнала и передаче его на объект управления. Такая модель достаточно универсальна. Действительно, условие перехода может включать время (что справедливо для систем с дискретным временем), состояние (в случае систем с дискретными событиями, релейных и проч.) или их комбинацию. Вычисление управляющего воздействия может осуществляться по различным алгоритмам, характерным для того или иного закона управления.

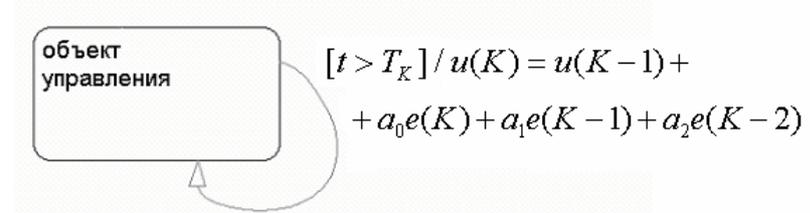


Р и с. 1. Универсальная гибридно-автоматная модель

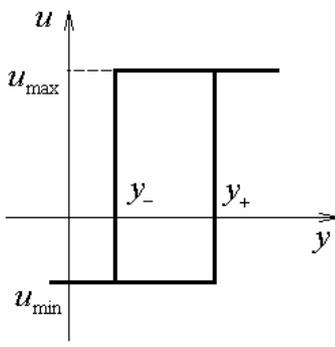
Кроме того, передача управляющего воздействия может происходить с временными задержками, потерей части информации и наложением шумовой составляющей, что имеет место в распределенных системах управления.

Рассмотрим наиболее существенные события, вызывающие переход, и, следовательно, инициирующие возможную смену сигнала управления.

Существенным событием может служить наступление некоторого момента времени. Это характерно для цифровых систем управления. Цифровая система автоматического управления (ЦСАУ) включает датчики, обеспечивающие ЦСАУ информацией о ходе процесса, цифровой регулятор, вычисляющий реакцию ЦСАУ на следующем шаге управления, и исполнительные механизмы, эту реакцию обеспечивающие. В ЦСАУ процесс управления непрерывным объектом носит дискретный по времени характер. В случае упрощенного подхода к описанию таких систем считают, что при наступлении события – очередного момента квантования – происходит мгновенное измерения выходного сигнала объекта, вычисление соответствующего выходного (управляющего) сигнала и передача его на исполнительный орган. Этот сигнал будет в неизменном виде действовать через исполнительный орган на объект вплоть до наступления следующего события. В этом случае совокупность управляющих поведением системы событий – это последовательность моментов квантования. Например, представленная в виде гибридного автомата ЦСАУ, реализующая ПИД-закон регулирования (рис. 2), будет иметь условие перехода $[t > T_K]$, где t – текущее время, T_K – момент выдачи очередного управляющего сигнала. Действие перехода будет заключаться в вычислении управления по следующей формуле: $u(K) = u(K-1) + a_0 e(K) + a_1 e(K-1) + a_2 e(K-2)$, $u(i)$ и $e(i)$ – соответственно управление и ошибка в i -тый момент времени [2].



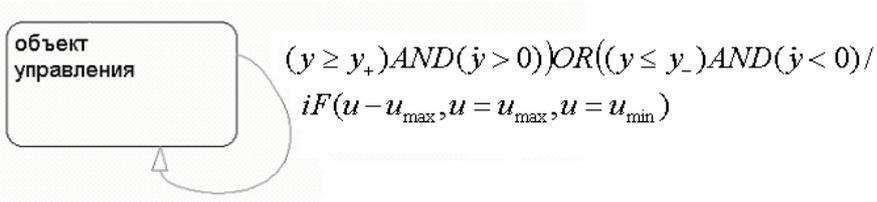
Р и с. 2. Гибридно-автоматная модель ЦСАУ, реализующей ПИД-закон регулирования



Р и с. 3. Характеристика релейного элемента с гистерезисом

Существенным событием может быть достижение каким-либо сигналом некоторого уровня. Это относится к нелинейным системам. Рассмотрим, например, нелинейную систему управления, релейный элемент которой имеет гистерезисную характеристику (рис. 3). В этом случае условие перехода имеет вид $((y \geq y_+) AND (\dot{y} > 0)) OR ((y \leq y_-) AND (\dot{y} < 0))$. Действие перехода состоит в изменении управляющего сигнала с u_{max} на u_{min} или обратно. Для описания действия можно использовать, например, функцию $iF(arg_1, arg_2, arg_3) = \begin{cases} arg_2, & \text{если } arg_1 < 0 \\ arg_3, & \text{если } arg_1 \geq 0 \end{cases}$. В этом случае дейст-

вие перехода будет иметь вид $iF(u - u_{max}, u = u_{max}, u = u_{min})$. Соответствующий гибридный автомат представлен на рис. 4.

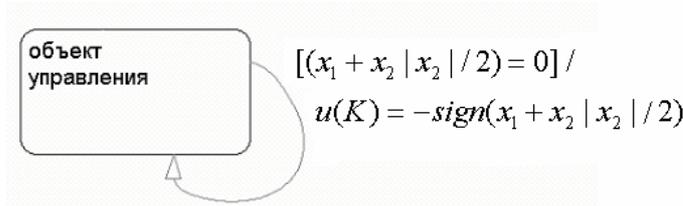


Р и с. 4. Гибридно-автоматная модель релейной САУ

Иногда переход инициируется посредством комбинации нескольких сигналов. Этому случаю соответствует оптимальный по быстродействию регулятор для объекта в виде двойного интегратора

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \frac{dx_2}{dt} = u.$$

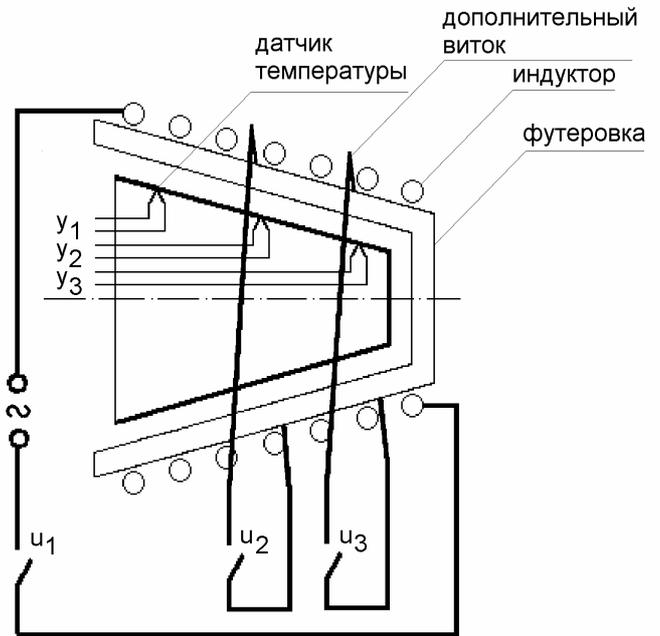
Для этой системы оптимального управления [3] условие перехода будет выглядеть следующим образом: $[(x_1 + x_2 | x_2 | / 2) = 0]$. Действие перехода заключается в вычислении управления $u(K) = -sign(x_1 + x_2 | x_2 | / 2)$. Оптимальная по быстродействию система управления двойным интегратором представлена в виде гибридного автомата на рис. 5.



Р и с. 5. Гибридно-автоматная модель системы, реализующей оптимальный по быстродействию регулятор для объекта в виде двойного интегратора

Существенным событием может служить наступление некоторого момента времени при условии, что определенный сигнал достиг некоторого уровня. Рассмотрим, например, созданную при участии автора и работающую по сей день на одном из заводов систему управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек на базе трехканального КСП со встроенными релейными регуляторами [4]. Схематично эта система представлена на рис. 6.

Изделие помещается внутрь индукционного нагревателя, который состоит из индуктора, питающегося от источника переменного тока, и теплоизоляции – футеровки. Температура нагрева контролируется термопарами в трех точках, разнесенных по длине нагреваемого тела (выходные сигналы y_1, y_2, y_3). Температурное поле на завершающей стадии процесса, когда, собственно, и происходит пайка, должно достаточно продолжительное время быть равномерным на уровне $y_1, y_2, y_3 \in [y_{зад} - \varepsilon, y_{зад} + \varepsilon]$, т.е. отклоняться от заданной температуры $y_{зад}$ не более чем на ε . Это требование обеспечивают три управляющих воздействия: u_1, u_2, u_3 . Основной канал управления u_1 – регулируемая двухпозиционным релейным регулятором КСП мощность питающего индуктор источника. Этот канал позволяет воздействовать на среднюю температуру изделия, нагретого до температур, сравнимых с $y_{зад}$ (средняя температура при этом растет, если $u_1 = u_{max}$, и снижается, если $u_1 = u_{min}$), но не в состоянии существенно изменять закон распределения температуры по длине изделия. Для обеспечения требуемой равномерности нагрева индуктор снабжен дополнительными витками. В разомкнутом состоянии ($u_i = 0, i = 2, 3$) витки не оказывают влияния на процесс нагрева. При замыкании витка ($u_i = 1$) в нем наводится противоЭДС. Это вызывает локальное снижение мощности нагрева в зоне размещения витка и способствует выравниванию температуры в нагреваемом изделии.



Р и с. 6. Система управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек

С учетом разделения во времени работы трех каналов КСП удобнее использовать в гибридно-автоматном описании этой системы три отдельных перехода, каждый из которых потенциально возможен в соответствующие интервалы времени. Логическое условие выполнения первого перехода будет выглядеть следующим образом: $(t \in [0, T] + 3nT) AND ((y_1 < y_{зад} - \varepsilon) OR (y_1 > y_{зад} + \varepsilon))$, где T - длительность работы каждого канала, а $n = 0, 1, 2, \dots$. Для второго и третьего переходов эти условия будут иметь соответственно вид $(t \in [T, 2T] + 3nT) AND (y_2 > y_{зад} + \varepsilon)$ и $(t \in [2T, 3T] + 3nT) AND (y_3 > y_{зад} + \varepsilon)$. Действия переходов можно описать при помощи функции iF . Действие первого перехода $iF(y_1 - (y_{зад} - \varepsilon), u_{max}, 1) \cdot iF(y_1 - (y_{зад} + \varepsilon), 1, u_{min})$, действие второго перехода $iF(y_2 - (y_{зад} + \varepsilon), 0, 1)$, дей-

ствии третьего перехода $iF(y_3 - (y_{зад} + \varepsilon), 0, 1)$. Гибридно-автоматная модель системы управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек представлена на рис. 7.



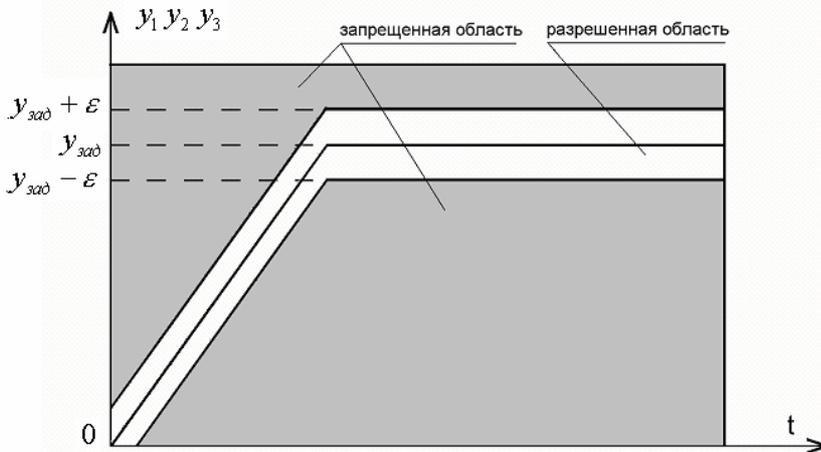
Р и с. 7. Гибридно-автоматная модель системы управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек

При исследовании гибридных автоматов традиционно решаются задачи, относящиеся к одному из следующих трех классов [5]: моделирование, верификация, синтез.

Удобным средством моделирования систем автоматического управления, представленных в виде гибридных автоматов, служит инструментальное средство Stateflow пакета MATLAB/Simulink [6]. MATLAB обеспечивает доступ к различным типам данных, высокоуровневому программированию и инструментальным средствам визуализации. Simulink поддерживает проектирование непрерывных и дискретных динамических систем в графической среде (в виде блок-схем). Stateflow - диаграммы, использующие визуальный формализм гибридных автоматов, включаются в модели Simulink, чтобы придать Simulink новые возможности моделирования управляемых событиями процессов. Stateflow обеспечивает ясное описание поведения сложных систем, используя диаграммы состояний и переходов. Условия и действия переходов могут содержать произвольные наборы команд языка MATLAB. Таким образом, комбинация MATLAB- Simulink - Stateflow является мощным универсальным инструментом моделирования реактивных систем. Дополнительная возможность отслеживания в режиме реального времени процесса выполнения диаграммы путем

включения режима анимации делает процесс моделирования систем по настоящему наглядным.

Хотя основным методом исследования Stateflow-моделей является имитационное моделирование, не меньший интерес представляет задача верификации гибридного автомата. Имея описание динамической системы, естественно задаться вопросом: как она будет себя вести? Среди задач верификации выделяют основную проблему достижимости: может ли система попасть за заданное время в заданную область. Связанная с ней проблема состоит в определении всех достижимых состояний. Зачастую встает вопрос: как избежать некоторого множества



Р и с. 8. Разрешенная и запрещенная области гибридно-автоматной модели системы управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек

ва недопустимых состояний? Так, для гибридно-автоматной модели системы управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек задача верификации может быть сформулирована следующим образом: доказать, что система не попадет в запрещенную область недопустимо больших абсолютных отклонений режима нагрева от предписанного, обозначенную как область серого цвета на рис. 8. Какие-либо общие результаты для всего круга задач верификации отсутствуют. Имеются работы, посвященные решению вопросов верификации лишь некоторых классов гибридных автоматов, реализованных в Stateflow [7]. Разработаны соответствующие программные средства.

Важно, что рассмотренный подход может быть использован не только для анализа, но и для синтеза САУ. Условие перехода и выражение, по которому производится вычисление управления, являются двумя степенями свободы регулятора. После назначения критерия качества работы САУ может быть организован

процесс поиска оптимального регулятора. Нужно будет определять два выражения: условие перехода и функцию, по которой вычисляется управляющее воздействие. Перспективным методом поиска является генетическое программирование в его векторном варианте [8].

Следует особо отметить, что при решении задач синтеза САУ модель в виде простейшего направленного графа (рис. 1) обладает несомненными преимуществами по сравнению с традиционными гибридно-автоматными моделями с несколькими вершинами, рассмотренными в [9]. Действительно, в последнем случае определению подлежит помимо всего прочего структура графа, что делает задачу в общем случае NP-трудной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рогачев Г.Н.* Гибридно-автоматный метод анализа и синтеза систем автоматического управления // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2006. №41. С. 43-47.
2. *Гудвин Г.К.* Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребне, М.Э. Сальгадо; М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
3. *Понтрягин Л.С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 391 с.
4. А. с. № 1791965 СССР, МКИ³Н 05 В 6/06. Индукционная нагревательная установка периодического действия / *Рогачев Г.Н.* Опубл. 30.01.93. Бюл. № 4.
5. *Maler O.* A unified approach for studying discrete and continuous dynamical systems. In Proc. of CDC'98, IEEE, 1998. 6 p.
6. *Рогачев Г.Н.* Моделирование в Simulink – Stateflow цифровых систем управления // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: Тр. Второй всероссийск. науч. конф. М.: ИПУ РАН, 2004. С. 1603-1607.
7. *Silva B.I., Krogh B.H.* Formal verification of hybrid systems using CheckMate: a case study. In Proc. of the American Control Conference, 2000. P. 1679-1683.
8. *Рогачев Г.Н.* Генетическое программирование в задачах поиска системотехнических решений // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2006. №40. С. 37-42.
9. *De Schutter B., Heemels W.P.M.H., Bemporad A.* Modeling and Control of Hybrid Systems. Lecture Notes of the DISC Course, Ch. 1-4, 2003. 102 p.

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2006 г.

УДК 681.5:681.3

В.К. Тяп

СИНТЕЗ МНОГОМЕРНЫХ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предлагается метод синтеза многомерных автономных систем по вектору задающего сигнала и инвариантных к вектору возмущающих воздействий, базирующийся на теории периодических структур. От известных подходов отличается непротиворечивостью условий достижения автономности и инвариантности.

Одной из проблем синтеза замкнутых многомерных систем является в общем случае многосвязность объекта управления, описываемого уравнениями [1]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A(t)x + B(t)u; \\ Y(t) = C(t) \cdot X(t) - D(t)U(t), \end{cases} \quad (1)$$

где X – вектор состояния; $A(t)$ – матрица объекта управления; Y – вектор выходных координат; $B(t)$ – матрица управления; U – вектор управляющих координат; $C(t)$, $D(t)$ – матрицы выходных координат.

Влияние управляющих координат на все выходные координаты (или на часть выходных координат) усложняет синтез замкнутых систем управления. Действительно, это следует из решения уравнений объекта

$$\begin{cases} X(t) = \Phi(t, t_0) \cdot X_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)B(\tau)U(\tau)d\tau; \\ Y(t) = C(t) \cdot X(t) + D(t) \cdot U(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $\Phi(t, t_0)$ - импульсная матрица, выражающаяся через фундаментальную матрицу системы $F(t)$ следующим образом:

$$\Phi(t, t_0) = F(t) \cdot F^{-1}(t_0). \quad (3)$$

Для стационарных систем импульсная матрица вычисляется через матричную экспоненту

$$\Phi(t, t_0) = e^{A(t-t_0)}. \quad (4)$$

В приведенных зависимостях (1) – (4) очевидно влияние компонент вектора управляющих воздействий на компоненты выходного вектора. Это усложняет управление многомерным объектом, и проблемы, обусловленные наличием перекрестных связей, могут быть решены достижением автономности контуров управления.

Другой проблемой является влияние вектора возмущающих воздействий на вектор управляемых координат. Решению данной проблемы посвящены работы [2], базирующиеся на необходимом условии достижения инвариантности, сформулированном академиком Б.Н. Петровым. Содержанием этого фундаментального принципа двухканальности является наличие как минимум двух каналов распространения от точки приложения возмущения до точки измерения регулируемой величины. Синтез инвариантных систем осуществляется с помощью корректирующих перекрестных компаундирующих связей. С другой стороны, это приводит к повышению многосвязности системы, что противоречит основной цели синтеза автономных систем. Заметим, что при наложении компаундирующих связей возникает вопрос физической реализуемости синтезированных САУ.

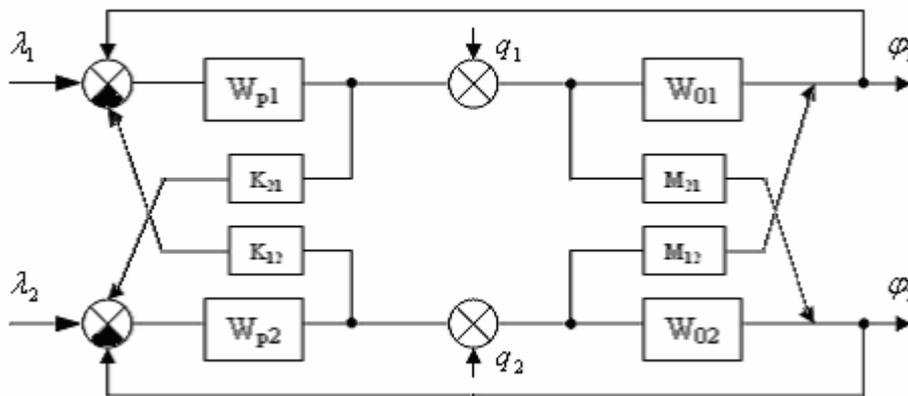
Из вышеизложенного следует, что условия достижения инвариантности и автономности в некотором смысле противоречат друг другу: автономность – достижение независимости каналов, а инвариантность – организация компаундирующих связей между контурами управления.

Фактически большинство из известных способов сводятся к синтезу компенсационных систем со всеми их недостатками [3]. Одним из недостатков является содержание в системах управления обратных передаточных функций объекта управления, что в итоге приводит к понижению ранга системы и, как следствие, к появлению неуправляемых и ненаблюдаемых частей (к потере управляемости и наблюдаемости в классическом понимании [1]).

Кроме того, возникают вопросы физической реализуемости корректирующих звеньев, содержащих обратные передаточные функции по отношению к объекту управления.

Широко известны структуры автономных и инвариантных систем управления для объектов с двумя входами и двумя выходами [2]. Для объектов с большим числом входов и выходов синтез инвариантных систем резко усложняется.

Ниже приведены типовые структурные схемы коррекции с целью достижения автономности.

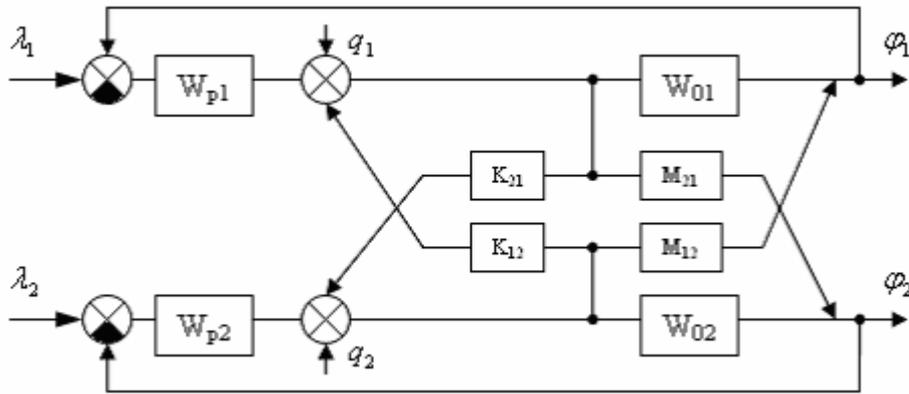


Р и с. 1. Структурная схема коррекции (вариант 1)

На рис. 1, 2 введены следующие обозначения: λ_1 и λ_2 – задающие сигналы; q_1 и q_2 – возмущения; ϕ_1 и ϕ_2 – выходные координаты; W_{01} , W_{02} , M_{12} , M_{21} – передаточные функции объекта управления; W_{p1} , W_{p2} – регуляторы; K_{12} , K_{21} – компенсирующие элементы.

Для схемы рис.1 условие автономности по задающим сигналам имеет вид

$$K_{12}^0 = -\frac{M_{12}}{W_{01}W_{p1}}; \quad K_{21}^0 = -\frac{M_{21}}{W_{02}W_{p2}}. \quad (5)$$



Р и с. 2. Структурная схема коррекции (вариант 2)

Для схемы рис.2 условия автономности по задающим сигналам и по возмущающим воздействиям имеют вид

$$K_{12}^0 = -\frac{M_{12}}{W_{01}}, \quad K_{21}^0 = -\frac{M_{21}}{W_{02}}. \quad (6)$$

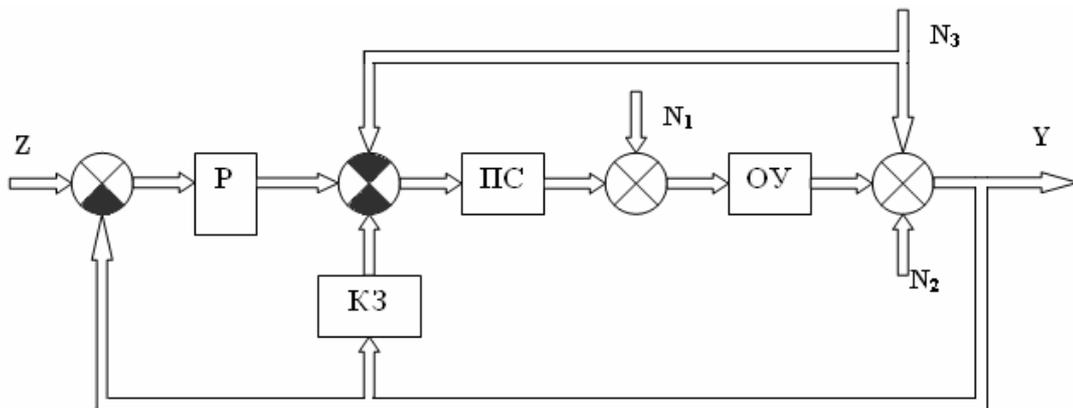
Как видно из формул (5), (6), синтез рассматриваемых систем требует нахождения обратных передаточных функций, что приводит к негативным последствиям, о которых говорилось выше.

Таким образом, фактически в этом случае задача синтеза управления (инвариантных систем) должна формулироваться как некорректная задача, и для получения практических результатов необходимо применять методы регуляризации [4], [5], [6].

Решение некорректных задач в области синтеза систем управления, работающих в реальном времени, получены в ряде работ [7], [8]. Ниже приводится метод, основанный на теории периодических структур, который позволяет добиться одновременно и автономности управляющих контуров управления, и инвариантности к возмущающим воздействиям.

Высокая эффективность периодических структур в случае измерения помехи на выходе объекта управления продемонстрирована в работе [7].

Структурная схема обобщенной комбинированной системы автоматического управления, построенной на базе периодических структур для многомерных объектов управления, представлена на рис. 3.



Р и с. 3. Обобщенная комбинированная САУ:

Z - вектор задающих сигналов; N₁, N₂ - векторы неизмеряемых помех; N₃ - вектор измеряемых помех, P - регулятор, ПС - периодическая структура, КЗ - корректирующее звено, ОУ - объект управления

Рассмотрим эффективность подавления вектора ненаблюдаемых помех на входе многомерного объекта. Передаточная функция по ненаблюдаемому вектору возмущения N1 без учета единичной обратной связи имеет вид

$$W_{N_1}(p, n) = W_{OY}(p)[I + W_{OY}(p)W_{ПС}(p, n)W_{КЗ}(p)]^{-1}, \quad (7)$$

где $W_{OY}(p)$ – передаточная функция многомерного объекта управления;

$W_{IC}(p, n)$ – передаточная функция периодической структуры;

$W_{K3}(p)$ – передаточная функция многомерного корректирующего звена.

При неограниченном увеличении числа ячеек периодической структуры после предельного перехода выражение (7) примет вид (при условии выполнения фундаментальности периодической структуры):

$$W_{N1}(p) = \lim_{n \rightarrow \infty} W_{N1}(p, n) = W_{OY}(p)[I + W_{K3}(p)]^{-1} \quad (8)$$

Не нарушая условия автономности, зададим структуру передаточной матрицы корректирующего звена в виде диагональной матрицы с одинаковым коэффициентом K . Равенство всех элементов данной матрицы не имеет принципиального значения. Таким образом, передаточная матрица корректирующего звена запишется как

$$W_{K3}(p) = K \cdot I. \quad (9)$$

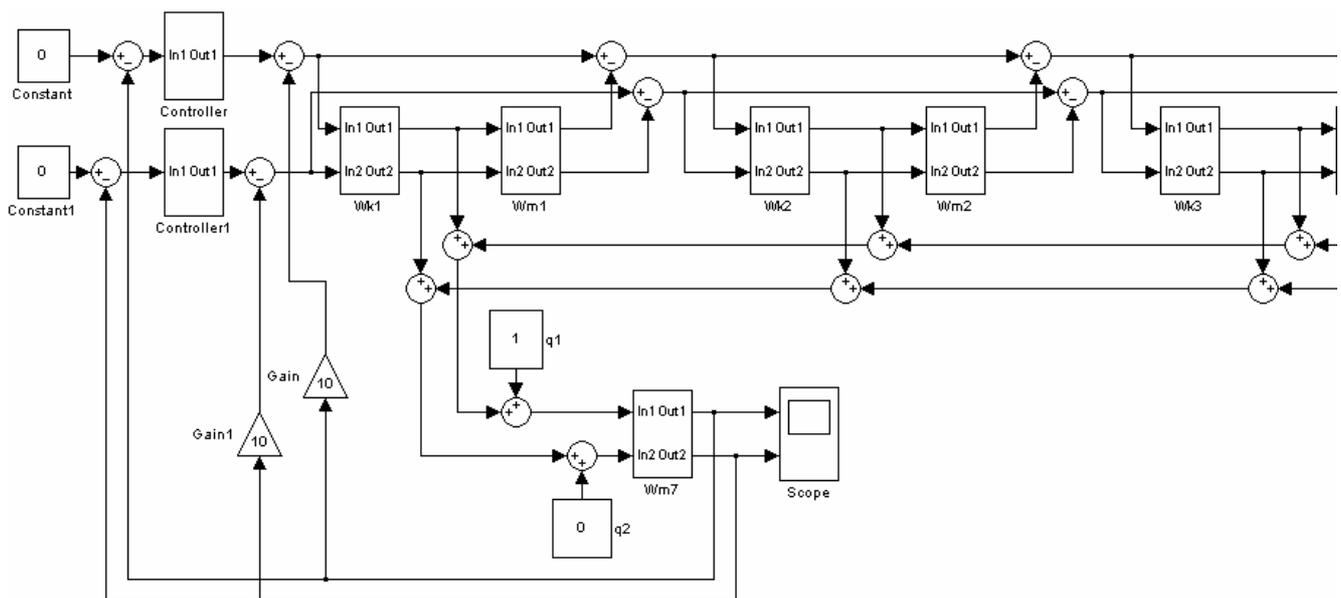
Тогда

$$[I + W_{K3}(p)]^{-1} = (K + 1)^{-1} \cdot I. \quad (10)$$

Следовательно,

$$W_{OY}(p)[I + W_{K3}(p)]^{-1} = (K + 1)^{-1} \cdot W_{OY}(p). \quad (11)$$

Отсюда следует, что, задаваясь числом K , можно получать $(K+1)$ -кратное подавление вектора неизменяемой помехи на входе многомерного объекта.

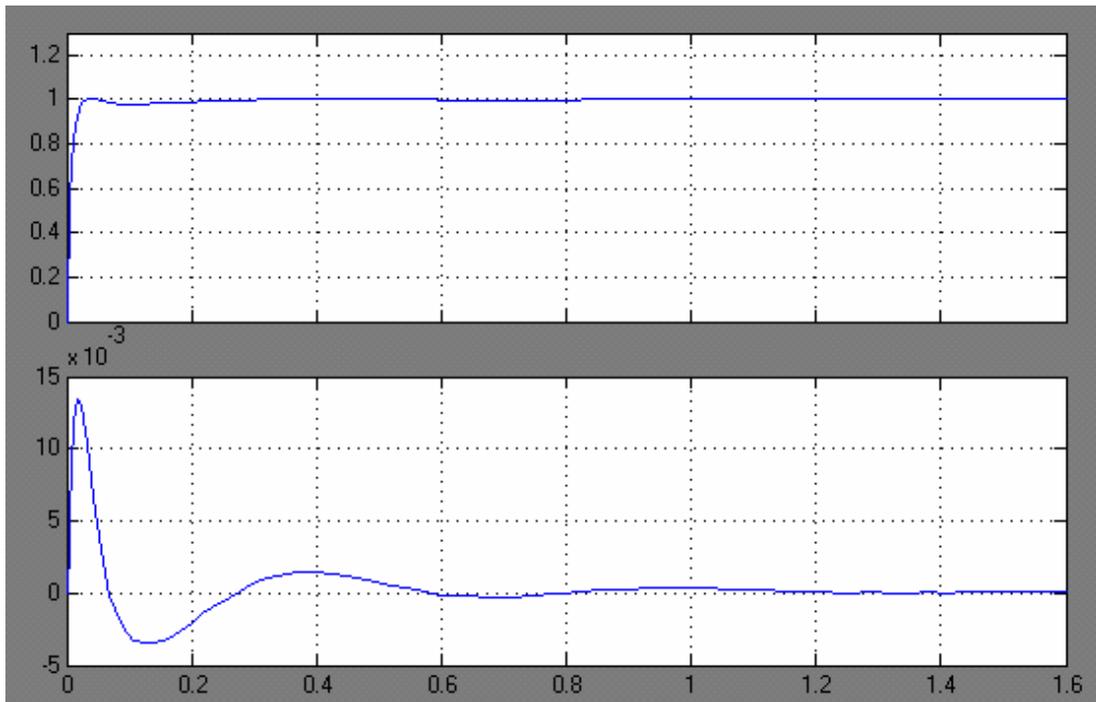


Р и с. 4. Обобщенная комбинированная САУ с двумя входами и двумя выходами (ППП Matlab)

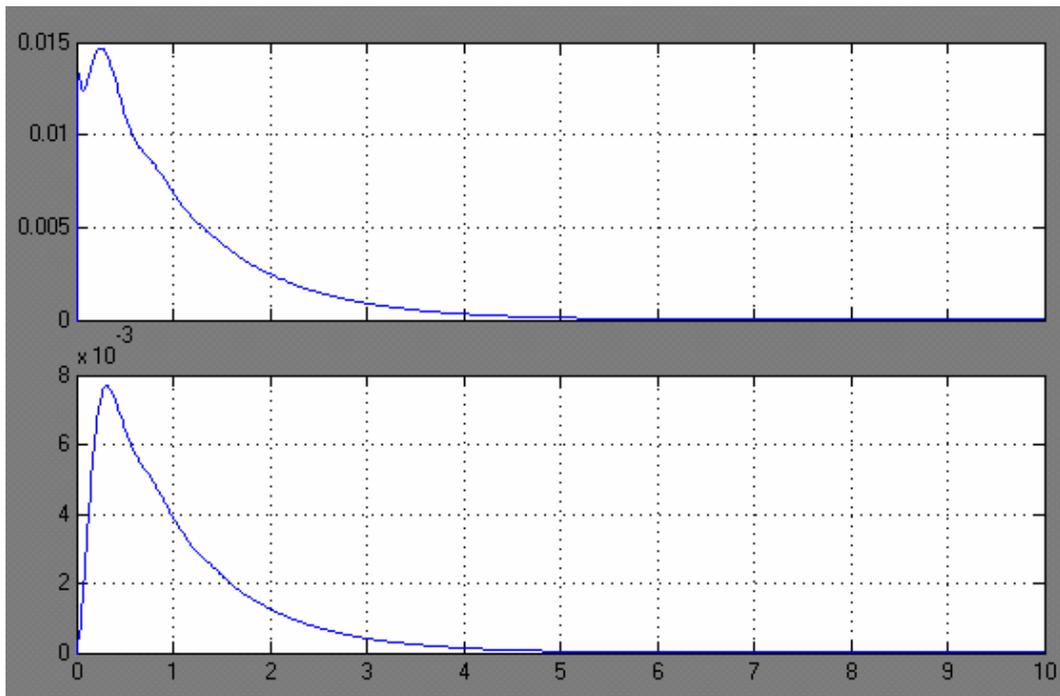
Высокая эффективность обобщенной комбинированной САУ по достижению автономности по вектору управляющих воздействий и инвариантности к неизменяемому вектору возмущающих воздействий проверена в ППП Matlab. На рис.4 представлена обобщенная комбинированная САУ с двумя входами и двумя выходами.

На рис.5,6 представлены результаты моделирования обобщенной комбинированной САУ.

График на рис.5 показывает высокую эффективность предлагаемого метода в достижении автономности, а графики на рис.6 – высокую степень подавления вектора неизменяемой помехи, приложенного к входу объекта управления.



Р и с. 5. Реакция обобщенной комбинированной САУ на задающее воздействие



Р и с. 6. Реакция обобщенной комбинированной САУ на возмущающее воздействие

Как нетрудно видеть, общность подхода к синтезу комбинированных систем управления с применением периодических структур позволяет строить системы для объектов с векторами управляющих и выходных координат любой размерности.

Анализ полученных результатов показывает, что вышеизложенный подход позволяет синтезировать автономные и инвариантные системы, удовлетворяющие общему функциональному требованию сходимости периодических структур при нахождении обратных операторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лившиц Н.А., Виноградов В.Н., Голубев Г.А. Корреляционная теория оптимального управления многомерными процессами. М: Советское радио, 1974.
2. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М: Энергия, 1970.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под общ. ред. К.А. Пупкова; Т.3. Синтез регуляторов САУ. М.: МГТУ, 2005.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М: Наука, 1979.
5. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990.
6. Тихонов А.Н., Гончаровский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990.
7. Рапопорт Э.Я., Тянь В.К. Достижение заданной инвариантности в стохастических системах комбинированного управления. / Куйбышевский политехн. ин-т. Деп. в ВИНТИ 20.06.89, № 4089-В89.
8. Тянь В.К. Теория периодических структур в некорректных задачах синтеза инвариантных и автономных систем управления // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2006. Вып. 41. С. 47-54.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2006 г.

УДК 681.5

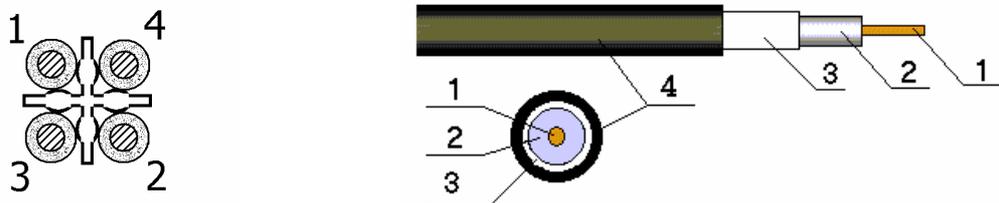
Б.К. Чостковский

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБОБЩЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Предлагаются способы синтеза структур систем автоматического управления обобщёнными параметрами симметричных кабелей (емкостной асимметрии) и коаксиальных кабелей (волновым сопротивлением). Предлагаются методы параметрической оптимизации разработанных структур по критерию нерегулярности производимых кабелей.

Физические цепи линий связи являются важным компонентом любых систем: радиоэлектронных, информационно-измерительных, автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. В технике проводной связи используются коаксиальные кабели связи и симметричные кабели связи с парной и четвёрочной скруткой. Эксплуатационные характеристики электрических кабелей связи определяются первичными и вторичными параметрами передачи и параметрами влияния. На основе данных параметров определены обобщённые параметры нерегулярных кабелей связи и обобщённый критериальный функционал, минимизация которого приводит к построению систем, оптимальных с точки зрения пропускной способности производимых кабелей [1].

С точки зрения эффективности автоматического управления, целью которого является минимизация нерегулярности изготавливаемых кабелей, наиболее перспективны конструкции симметричных кабелей с четвёрочной скруткой и введённым фигурным корделем и коаксиальные кабели с продольно накладываемым внешним проводником. Конструкции данных кабелей показаны на рис. 1.



Р и с. 1. Конструкции электрических кабелей связи

По скрученной четвёрке симметричного кабеля организуются две основные цепи по жилам 1,2 и 3,4. По всем четырём жилам организуется третья – искусственная цепь.

Основные ограничения на эксплуатационные характеристики симметричных кабелей связи накладываются величинами взаимных влияний цепей [2]. Коэффициент электромагнитной связи основных цепей на ближнем конце определяется по формуле

$$N_{12} = C_{12}z + \frac{M_{12}}{z}, \quad (1)$$

где C_{12} – электрическая ёмкостная связь; M_{12} – магнитная связь; z – волновое сопротивление.

С учётом коррелированности электрических и магнитных связей минимизация взаимных влияний может быть достигнута путём минимизации ёмкостной асимметрии, которая оценивается величинами ёмкостной связи:

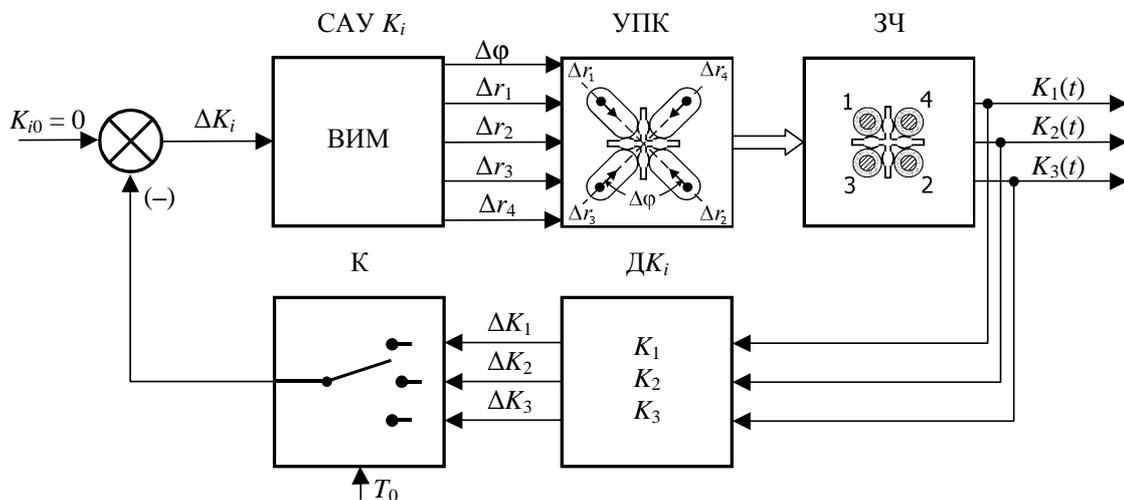
$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23}), \quad (2)$$

$$K_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24}), \quad (3)$$

$$K_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24}), \quad (4)$$

где K_1 – ёмкостная связь между основными цепями четвёрки; K_2, K_3 – ёмкостные связи между основными (первая и вторая) и искусственной цепями; C_{ij} – частичная ёмкость между i -той и j -той жилами.

Целью управления процессом скрутки звёздной четвёрки симметричного кабеля является достижение нулевых значений K_1, K_2, K_3 . С этой целью в процессе скрутки производится непрерывное измерение текущих значений коэффициентов K_1, K_2, K_3 специальным датчиком и управление расстояниями между жилами путём прокатки утолщений на лепестках фигурного корделя двумя парами роликов, как показано на эскизе устройства прокатки фигурного корделя УПК на рис. 2.



Р и с. 2. Функциональная схема САУ коэффициентов емкостной связи в процессе скрутки звездной четвёрки симметричного кабеля

На рис. 2: САУ K_i – трехканальная САУ с времяимпульсным воздействием (ВИМ); УПК – устройство прокатки фигурного корделя; ЗЧ – звёздная четвёрка; К – коммутатор трех контуров регулирования; ДК_{*i*} – датчик текущих значений коэффициентов емкостной связи.

Автономность управления в каждом из трёх контуров достигается тем, что коэффициент K_1 регулируется взаимным угловым перемещением $\Delta\varphi$ двух пар роликов, а коэффициенты K_2 и K_3 – радиальными перемещениями роликов Δr_i .

Экспериментальные исследования данной системы подтвердили возможность скрутки четвёрок с практически нулевыми значениями K_1, K_2 и K_3 . Однако при релейных законах управления взаимные влияния цепей не только не уменьшились, но даже увеличились. Уменьшение взаимных влияний достигается при использовании пропорционально-интегральных регуляторов, параметры которых оптимизируются путём минимизации обобщённого критериального функционала [1].

Нерегулярность коаксиального кабеля связи определяется вариациями волнового сопротивления, обусловленными стохастическим характером работы комплекса систем автоматической стабилизации всех параметров кабеля в процессе его изготовления. Малость вариаций всех стабилизируемых параметров, описываемых как динамические ошибки соответствующих систем стабилизации, обуславливает адекватность линеаризованной зависимости волнового сопротивления z от регулируемых параметров кабеля:

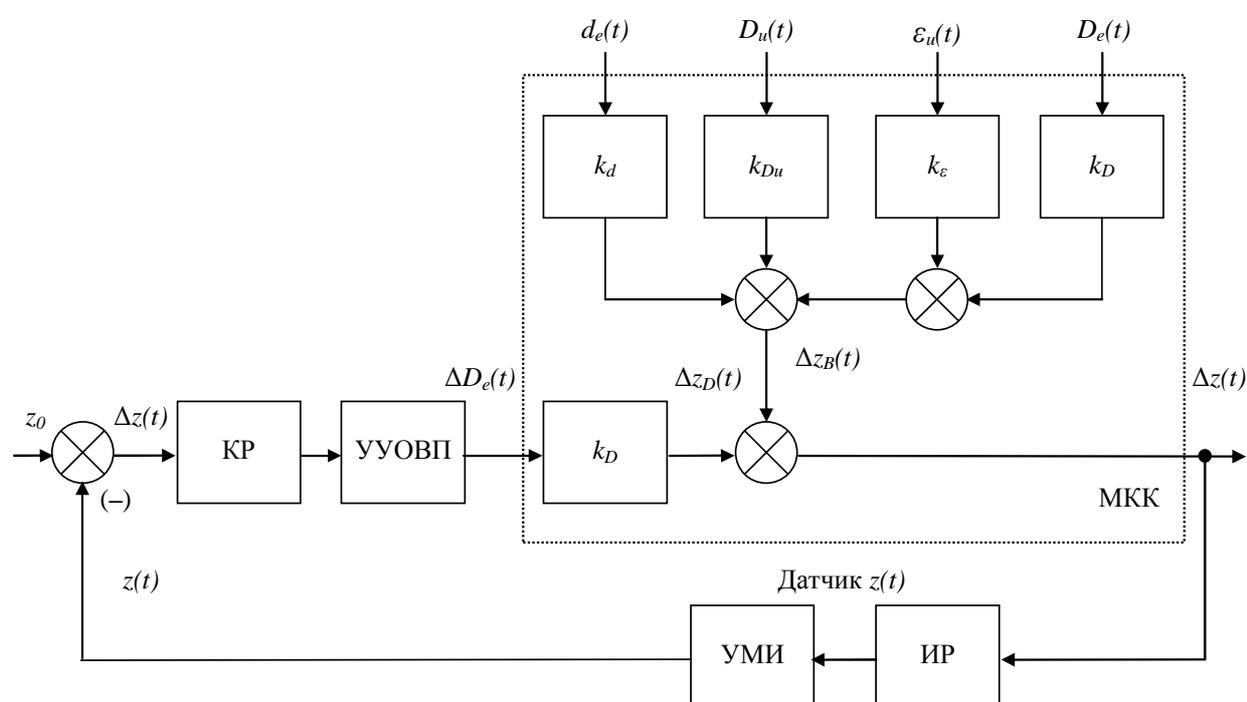
$$z(t) = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e(t)}} \cdot \ln \frac{D(t)}{d(t)} \approx z_0 + \Delta z_B(t) + \Delta z_D(t), \quad (5)$$

где t – время, соответствующее координате сечения кабеля, который проходит исполнительное устройство, формирующее величину внутреннего диаметра внешнего проводника $D(t)$; ϵ_e – относительная диэлектрическая проницаемость среды между внутренним и внешним проводниками; d – диаметр внутреннего проводника; z_0 – заданное номинальное значение волнового сопротивления; $\Delta z_B(t)$ – вариации волнового сопротивления, обусловленные вариациями всех параметров; $\Delta z_D(t)$ – управляемое приращение волнового сопротивления, определяемое вводимым приращением внутреннего диаметра внешнего проводника D .

Цель управления – стабилизация волнового сопротивления на уровне z_0 . Данная цель может быть достигнута двумя способами – управлением по отклонению (ошибке) и управлением по возмущению.

Согласно первому способу [3], при наложении трубчатого внешнего проводника к заправочному концу кабеля, принимаемого на барабан, подключается импульсный рефлектометр ИР, который совместно с устройством фиксации места измерения УМИ образует датчик волнового сопротивления в месте расположения обжимного устройства, формирующего диаметр D .

Стабилизация волнового сопротивления на уровне z_0 , согласно схеме рис. 3, достигается введением управляющего воздействия $\Delta D_e(t)$, которое обуславливает приращение волнового сопротивления $\Delta z_D(t)$, компенсирующее возмущение $\Delta z_B(t)$, согласно (5).



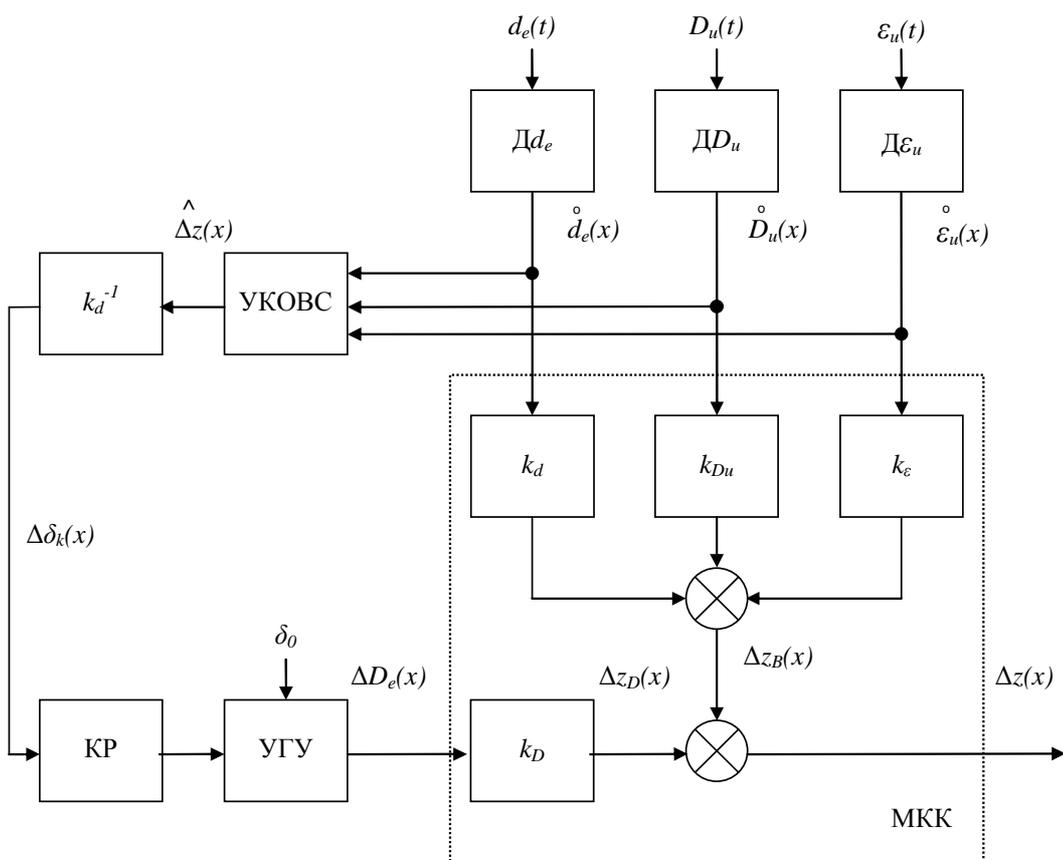
Р и с. 3. Структурная схема управления волновым сопротивлением по отклонению

На рис. 3: УУОВП – управляемое устройство обжатия внешнего проводника; КР – компенсационный регулятор; МКК – модель коаксиального кабеля; ИР – импульсный рефлектометр; УМИ – устройство фиксации места измерения волнового сопротивления в месте обжатия внешнего проводника; k_d , k_{Du} , k_ϵ , k_D – чувствительности волнового сопротивления к параметрам кабеля.

По второму способу [4], реализация которого показана на рис. 4, при наложении гофрируемого внешнего проводника по измеряемым “на проход” параметрам осуществляется оценка прогнозируемого отклонения волнового сопротивления от номинального значения в сечении кабеля x , соответствующем месту расположения гофрирующего устройства.

На рис. 4: УКОВС – устройство косвенной оценки волнового сопротивления в сечении расположения управляемого гофрирующего устройства УГУ; КР – компенсационный регулятор; МКК – модель коаксиального кабеля; Dd_e , DD_u , $D\epsilon_u$ – датчики диаметра внутреннего проводника, диаметра и диэлектрической проницаемости изоляции; k_d , k_{Du} , k_ϵ – чувствительность волнового сопротивления к измеренным параметрам изолируемого внутреннего проводника; K_D – чувствительность волнового сопротивления к внутреннему диаметру внешнего проводника.

При наличии такого отклонения волнового сопротивления система вводит приращение глубины гофрирования, вызывающее приращение эффективного внутреннего диаметра внешнего проводника, которое обуславливает приращение $\Delta z_D(x)$, компенсирующее оцененное возмущающее воздействие $\Delta z_B(x)$.



Р и с. 4. Структурная схема управления волновым сопротивлением по возмущающему воздействию

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность описанных способов при оптимизации настроек цифровых регуляторов по обобщённому критериальному функционалу, численно характеризующему нерегулярность коаксиального кабеля [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чостковский Б.К. Алгоритмизация и частотная оптимизация управления процессами производств кабелей связи // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. Вып. 5. Самара, 1998. С. 28-35.
2. Андреев В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи. М.: Радио и связь, 1999.
3. Абросимов А.А., Семенов В.В., Чостковский Б.К. Устройство для повышения однородности волнового сопротивления коаксиального кабеля. А.С. №803016. 1980. БИ№30, 1981.
4. Чостковский Б.К., Уклеин Д.А., Павлов А.А., Тянь В.К. Устройство для изготовления коаксиального кабеля. А.С. №1304090. 1986. БИ№14, 1987.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2006 г.