

УДК 004.942

МНОГОУРОВНЕВАЯ РЕКУРРЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ РЕГИОНА

А.В. Маслобоев^{a,b}, В.А. Путилов^{a,b}, А.В. Сютин^{a,c}

^a Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация

^b Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация, masloboev@iimm.ru

^c Университет Бергена, Берген, N-5020, Норвегия

Аннотация.

Предмет исследования. Целью исследования является разработка методов и средств математического и компьютерного моделирования систем информационного обеспечения региональной безопасности как многоуровневых иерархических систем. Эти системы характеризуются слабой формализованностью, многоаспектностью происходящих в них процессов и их взаимосвязанностью, динамичностью и высокой степенью неопределенности. Методологическая база исследования включает функционально-целевой подход и аппарат теории иерархических многоуровневых систем. В работе решаются задачи анализа и структурно-алгоритмического синтеза автоматизированных систем, ориентированных на информационную поддержку процессов управления и принятия решений в сфере региональной безопасности.

Основные результаты. Разработана многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем. Модель основана на функционально-целевом подходе и обеспечивает как формальную постановку и решение, так и практическую реализацию задач синтеза структуры автоматизированных систем и алгоритмов управления региональной безопасностью, оптимальных в смысле определенных критериев. Предложен подход к решению задач внутриуровневой и межуровневой координации в многоуровневых иерархических системах. Такая координация обеспечивается за счет удовлетворения требований взаимосвязи между показателями качества функционирования (целевыми функциями), оптимизируемыми различными элементами многоуровневых систем. Это позволяет достичь достаточной согласованности локальных решений, принимаемых на разных уровнях управления, в условиях децентрализованного принятия решений и высокой динамики внешней среды. Использование рекуррентной модели позволяет сформировать математические модели управления безопасностью региональных социально-экономических систем, функционирующих в условиях неопределенности.

Практическая значимость. Практическая реализация предложенной модели позволяет проводить автоматизированный синтез программной исполнительской среды информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в сфере региональной безопасности. Модель сможет найти применение при создании методологии математического и компьютерного моделирования многоуровневых иерархических систем управления комплексной безопасностью сложных систем.

Ключевые слова: математическое моделирование, многоуровневая иерархическая система, управления, координация, рекуррентная модель, региональная безопасность, поддержка принятия решений.

Благодарности. Результаты работы получены в ходе исследований, проводимых по планам научно-исследовательских работ Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН (НИР № 01201452426 «Методы и когнитивные технологии создания, исследования и использования виртуальных систем поддержки управления комплексной безопасностью развития Арктической зоны Российской Федерации»). Авторы выражают благодарность своим коллегам по лаборатории за участие во всестороннем обсуждении результатов работы.

MULTILEVEL RECURRENT MODEL FOR HIERARCHICAL CONTROL OF COMPLEX REGIONAL SECURITY

A.V. Masloboev^{a,b}, V.A. Putilov^{a,b}, A.V. Sioutine^{a,c}

^a Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation

^b Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation, masloboev@iimm.ru

^c University of Bergen, Bergen, N-5020, Norway

Abstract.

Subject of research. The research goal and scope are development of methods and software for mathematical and computer modeling of the regional security information support systems as multilevel hierarchical systems. Such systems are characterized by loosely formalization, multiple-aspect of descendent system processes and their interconnectivity, high level dynamics and uncertainty. The research methodology is based on functional-target approach and principles of multilevel hierarchical system theory. The work considers analysis and structural-algorithmic synthesis problem-solving of the multilevel computer-aided systems intended for management and decision-making information support in the field of regional security.

Main results. A hierarchical control multilevel model of regional socio-economic system complex security has been developed. The model is based on functional-target approach and provides both formal statement and solving, and practical implementation of the automated information system structure and control algorithms synthesis problems of regional security management optimal in terms of specified criteria. An approach for intralevel and interlevel coordination problem-solving in the multilevel hierarchical systems has been proposed on the basis of model application. The coordination is provided at the expense of interconnection requirements satisfaction between the functioning quality indexes (objective functions), which are optimized by the different elements of multilevel systems. That gives the possibility for sufficient coherence reaching of the

local decisions, being made on the different control levels, under decentralized decision-making and external environment high dynamics. Recurrent model application provides security control mathematical models formation of regional socio-economic systems, functioning under uncertainty.

Practical relevance. The model implementation makes it possible to automate synthesis realization of the software executive environment for decision-making information and analytical support in the field of regional security. The model can find further application within mathematical and computer modeling methodology development of the multilevel hierarchical systems for security control of complex systems.

Keywords: mathematical modeling, multilevel hierarchical system, control, coordination, recurrent model, regional security, decision-making support.

Acknowledgements. Findings of this investigation are received within the bounds of research works carried out according to research plans of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (project №01201452426 "Methods and cognitive technologies for engineering, analysis and application of the virtual systems for complex security management support of the of the Russian Federation Arctic zone development"). The authors express their thanks to their lab colleagues for assistance and participation within the comprehensive discussion of the research results.

Введение

Анализ тенденций развития социально-экономической и геополитической ситуации в глобальном, региональном и национальном масштабах показывает, что обстановка в Арктической зоне Российской Федерации является в целом сложной для нашей страны. В условиях активного геостратегического переустройства мира и борьбы мировых центров силы за контроль над ресурсами (природными, кадровыми, информационными и т.д.) проблемы становления новой системы обеспечения региональной безопасности в Российской Арктике не теряют своей остроты и актуальности. Эти проблемы дают определенный импульс развитию сферы компьютерных технологий для задач управления комплексной безопасностью региональных систем, так как их решение во многом требует интеграции, обработки и анализа больших объемов семантически и организационно разнородной информации для информационного обеспечения межведомственной деятельности в области региональной безопасности, а также поддержки принятия решений на разных уровнях управления.

Решение задач информационной поддержки управления региональной безопасностью затрудняется отсутствием целостной многофункциональной информационной инфраструктуры региональной безопасности в арктических регионах [1], что препятствует эффективному использованию в практической деятельности субъектов безопасности интеллектуализированных многоуровневых автоматизированных систем управления комплексной безопасностью, интегрированных в единое информационное пространство региона. Такая информационная среда, согласно исследованиям [2–4], призвана обеспечить комплексную информационно-аналитическую поддержку процессов принятия стратегических и оперативных решений на разных уровнях управления на основе применения заложенного в нее методического инструментария и соответствующих информационных технологий, т.е. управления системой обеспечения комплексной безопасности региона.

Под региональной безопасностью понимается состояние защищенности региональной системы, при котором действие внешних и внутренних факторов не приводит к ухудшению или к невозможности ее функционирования или развития. Определение и формализация термина «региональная безопасность» подробно рассматриваются в работе [5]. Управление региональной безопасностью – сложная многокритериальная задача. Для успешного решения этой задачи на практике необходимо, чтобы процессы обеспечения региональной безопасности были управляемыми, т.е. существовала система управления этими процессами, способная к структурной реконфигурации, самоорганизации и адаптации состояния, параметров и режимов функционирования к динамике внешней среды в различных условиях и ситуациях. Процессы обеспечения безопасности компонентов региональных систем разнородны по динамике и составу участников. Субъекты безопасности, вовлеченные в эти процессы, как правило, территориально распределены. Это обуславливает динамичность и разнородность информационной среды региональной безопасности, необходимость в механизмах координации взаимодействия образующих ее подсистем в условиях децентрализованного управления и принятия решений. Такая среда характеризуется сетечностью [6] и синтезируется на базе объединения многоуровневых систем управления различными видами безопасности.

Управление региональной безопасностью по своей структуре многофункционально и в общем случае включает в себя такие функции управления, как целеполагание, стратегическое планирование, оперативное управление, а также функции контроля, учета, мониторинга и координации. Для эффективного децентрализованного принятия решений на разных уровнях управления безопасностью региона в условиях многокритериальности решаемых задач управления и различий в целеполагании разнородных субъектов безопасности необходимо обеспечить межузловую и внутриузловую координацию взаимодействия между ними за счет удовлетворения требований взаимосвязи между показателями качества

функционирования (целевыми функциями), оптимизируемыми различными элементами соответствующей системы управления комплексной безопасностью региона.

В работе рассматриваются различные теоретические аспекты организации и структурно-алгоритмического синтеза многоуровневых распределенных систем информационной поддержки управления региональной безопасностью. Предложена многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем. Результаты работы получены на основе применения функционально-целевого подхода, развитого для класса задач с древовидными моделями предметной области [7] и предложенного профессором В.А. Путиловым в начале 80-х годов прошлого века для решения проблем управления сложными распределенными объектами [8], в том числе региональными социально-экономическими системами.

Моделирование многоуровневых распределенных систем управления региональной безопасностью на базе функционально-целевого подхода

В функционально-целевом подходе рекуррентная модель предметной области служит основой формализации главных задач структурно-алгоритмической организации автоматизированных систем и методов решения этих задач. Новизна рекуррентной модели определяется, во-первых, тем, что при построении модели целевого управления использована иерархия двухоперационных алгебр цепочек целей и совершенно аналогичных по структуре цепочек действий, обеспечивающих достижение этих целей. Во-вторых, иерархия целей в модели непосредственно порождает модель иерархии действий, что обеспечивает использование иерархии целей не только в качестве средства описания задачи, но и как средства проектирования системы управления. Модель основана на иерархической структуре задач управления региональной безопасностью и использует последовательно-параллельные композиции целей управления и действий по достижению этих целей.

В применении к задачам синтеза автоматизированных систем управления комплексной безопасностью на практике, как правило, используются модели в виде графа с произвольной структурой, нечеткие [9], когнитивные [10] и имитационные [5] модели опять же на базе таких графов. Для многоуровневых распределенных систем такие модели уже малоприменимы, так как приводят к сложным моделям в виде системы вложенных графов произвольной структуры. Иерархические модели успешно применяются в других приложениях. Наиболее близок к настоящей работе программно-целевой подход [11], но здесь модель не древовидная, и это объясняется спецификой предметной области, где непременно должны присутствовать связи между элементами одного уровня. При решении оптимизационных задач в программно-целевом подходе используется достаточно сложный аппарат траекторной оптимизации.

В многоуровневых распределенных системах такие понятия, как «цель», «целенаправленная деятельность», «целенаправленные системы», тесно связаны с понятиями «принятие решений» и «системы принятия решений» [12]. Целенаправленное поведение, в сущности, представляет собой последовательность принимаемых и реализуемых решений. Вследствие возможности представления систем типа вход-выход в виде решающих систем [13], и наоборот, цели могут быть определены через решаемые задачи. В связи с этим цель считается достигнутой, когда найдено решение соответствующей задачи (задача может быть оптимизационной). В дальнейшем в соотношении между целями и решаемыми задачами в работе будет вкладываться именно такой смысл.

Для решения задач структурно-алгоритмического синтеза многоуровневой автоматизированной системы управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем необходимо построить на основе функционально-целевого подхода модель данной предметной области и соответствующую ей в определенном смысле модель автоматизированной системы управления региональной безопасностью. Вместе с тем, необходимо задать критерий эффективности функционирования системы и определить механизм построения систем автоматизированного управления региональной безопасностью, эффективных в смысле заданного критерия, на базе созданных моделей.

Реализация функционально-целевого подхода, базирующегося на концепции управления через целеполагание и предполагающего соответствие функций системы управления целям предметной области, обеспечивает как формальную постановку и решение, так и практическую реализацию задач синтеза структуры автоматизированной системы и алгоритмов управления региональной безопасностью, оптимальных в смысле определенных критериев. Таким подходом обеспечивается и учет особенностей решаемых задач управления и принятия решений.

Иерархическое представление систем используется в разных приложениях, в том числе и для многоуровневых систем управления. Это объясняется простотой и наглядностью иерархических моделей, хорошо отражающих реальные взаимосвязи в окружающем нас мире, включая организации людей. Существуют и другие доводы в пользу иерархических многоуровневых систем [13, 14]:

- эти системы появляются при интеграции уже созданных систем;
- для решения общей задачи системы могут эффективно использоваться ограниченные возможности подсистем;

- системы лучше адаптируются к изменениям и усложнениям задач и обладают хорошими показателями надежности (неисправности в работе какой-либо подсистемы не всегда распространяются на всю систему).

Однако в многоуровневых иерархических системах возникают задачи координации, и использование этих систем оправданно, если удастся упростить задачу координации до такой степени, чтобы она была значительно проще решаемой проблемы.

В работе [15] под общей многоуровневой иерархической системой понимается совокупность объектов и элементов, в которых рассматриваются процессы, управляемые соответствующими субъектами управления, имеющими собственные сферы интересов (цели) в условиях иерархической подчиненности основному субъекту управления. Система функционирует в конкретной среде при наличии неопределенности и имеет в своем составе следующие компоненты:

- средства ввода, вывода, приема, хранения, анализа, обработки и передачи данных, сопряженные с ее объектами или элементами;
- средства, позволяющие реализовать математические, логические и иные операции, сопряженные с ее объектами или элементами;
- средства для реализации информационных и управляющих связей между ее объектами или элементами;
- средства, позволяющие реализовать выбранные системы кодирования и декодирования данных, сопряженные с ее объектами или элементами.

Иерархическая структура заложена в самом понятии комплексной безопасности региона, заведомо образуемой различными по характеру согласованными составляющими региональной безопасности (экономической, экологической, социальной и др.). Каждая из составляющих региональной безопасности, в свою очередь, образуется набором объектов, субъектов, процессов и методов обеспечения безопасности, потенциальных угроз и опасностей. Такая детализация может продолжаться и далее.

Обращаясь к соотношению между целями и решениями задач (если найдено решение задачи, в том числе и оптимизационной, то достигнута соответствующая цель), видно, что процесс последовательной детализации задачи в области управления региональной безопасностью представляется деревом декомпозиции целей управления. Обратимся к задаче синтеза структуры многоуровневой системы управления региональной безопасностью, обеспечивающей достижение целей управления. Такая задача имеет много аспектов. Доказанная в работе [13] теорема о подсистемах многоуровневой системы показывает, что система в целом должна строиться из таких подсистем, которые обеспечивают покрытие соответствующих подзадач основной целевой задачи многоуровневой системы. Из теоремы также следует, что синтез структуры системы должен проводиться изоморфно построению основной цели из некоторой совокупности подцелей.

Рекуррентная модель иерархического управления региональной безопасностью

Перейдем к построению формальной рекуррентной модели иерархического управления региональной безопасностью и многоуровневых систем управления ей. Макроструктура многоуровневой системы управления комплексной безопасностью региона, построенная изоморфно декомпозиции основной целевой задачи обеспечения региональной безопасности, представляется в виде дерева. Корню дерева ставится в соответствие подсистема верхнего уровня (собственно система), вершинам дерева, отстоящим от корня на одно ребро, – подсистемы, реализующие классы безопасности, на три ребра – подсистемы, реализующие методы и средства обеспечения безопасности, и т.д.

Построение виртуальной макроструктуры системы и отображение ее на реальную структуру программно-аппаратных средств позволяет определить набор элементарных компонентов для структурно-алгоритмического синтеза системы. Синтез адекватной системы – трудоемкая задача, связанная с необходимостью удовлетворения условий изоморфизма на всех соответствующих уровнях декомпозиции задачи и организации системы, причем эти требования должны удовлетворяться для любой задачи рассматриваемой предметной области, что находится в противоречии с требованием гибкости системы по отношению к описанию предметной области. Поэтому для практических приложений актуальна задача синтеза покрывающих систем [13], обеспечивающих решение задач субъекта управления на всех уровнях организации системы с удовлетворяющими его значениями параметров качества цепочек действий. При этом по известным параметрам атомарных элементов нижнего уровня макроструктуры строятся отображения алгебры цепочек на алгебры соответствующих параметров «снизу вверх», до уровня иерархии системы, на котором субъект управления может принять решение либо о целесообразности использования синтезированной системы, либо о необходимости изменения постановки задачи или коррекции программно-аппаратного обеспечения системы с целью изменения параметров атомарных элементов.

Будем характеризовать любой элемент M макроструктуры системы состоянием S , управляющим воздействием U для задания режима работы элемента и его состояния, входной информацией W . Поскольку элементы макроструктуры – это программы, ориентированные на прием, переработку и переда-

чу информации, то результатом работы элемента M является некоторая выходная информация V . Будем рассматривать результирующую информацию V как некоторую функцию от состояния элемента макро-структуры M , входной информации и управляющего воздействия: $V = M(U, S, W)$.

Под элементарной неделимой единицей алгоритма управления безопасностью условимся понимать функциональную операцию L – некоторую совокупность действий исполнительской системы, зависящих от управляющего воздействия, состояния элемента макро-структуры и его внутренней структуры: $L = M(U, S)$. Функциональные операции выполняют преобразование входной информации W в выходную следующим образом: $L_{MUS} : V = L_{MUS}(W)$. Считывание состояния элемента макро-структуры достигается подачей специального управляющего сигнала U_0 : $S = L_{MUS_n}(0)$.

Таким образом, определен алфавит функциональных операций (множество атомарных действий системы): $L = M \times U \times S$.

Представим содержательную информацию рассматриваемой предметной области (региональной безопасности) в виде формальных высказываний. Построим алгебраическую систему $A = \langle A, Q, R \rangle$, состоящую из непустого множества A , семейства алгебраических операций Q и семейства отношений R . Для задания такой системы определим некоторые исходные объекты, которые будем рассматривать как неделимые; перечислим способы комбинирования исходных объектов между собой; укажем условие, которому удовлетворяют те и только те комбинации исходных объектов, которые считаются элементами системы; сформулируем условие, при котором два элемента системы считаются равными.

Отождествим семейство Q алгебраических операций с организацией совокупной цели управления из известных атомарных целей, достижение которых реализуется атомарными действиями, заданными алфавитом L . Такие совокупные цели обеспечиваются комбинациями последовательного и параллельного (одновременного) достижения атомарных целей, т.е. композициями элементов функционального алфавита целей, построенными с использованием двух обобщенных операций:

1. операция \odot : достичь атомарной цели a_2 после достижения атомарной цели a_1 ;
2. операция \oplus : достичь атомарной цели a_2 одновременно с атомарной целью a_1 .

Использование принципа управления через целеполагание обеспечивает организацию всего многообразия вариантов обеспечения региональной безопасности через композиции элементов функционального алфавита, построенные с использованием двух введенных обобщенных операций. Действительно, совокупная цель достигается последовательно-параллельной комбинацией подцелей нижнего уровня.

Введем точно такие же операции для атомарных действий – элементов функционального алфавита L . Зададим операцию как последовательное применение следующей функциональной операции к результату предыдущей:

$$\odot : L_j = L_{j-2} \odot L_{j-1} \rightarrow L_j(W) = L_{j-1}(L_{j-2}(W)).$$

Операцию \oplus зададим как одновременное выполнение двух атомарных воздействий:

$$\oplus : L_j = L_i \oplus L_k \rightarrow L_j(W) = \begin{cases} L_i(W_i), \\ L_k(W_k). \end{cases}$$

Операция \odot производит последовательный запуск и исполнение выбранных атомарных элементов вычислительного процесса. Операция \oplus производит параллельный запуск выбранных атомов.

В работе [13] проведены исследования полученной алгебры строк (цепочек), определены свойства замкнутости, ассоциативности, коммутативности относительно введенных операций \oplus и \odot , а также установлено наличие нулевого, единичного и обратных элементов. Не теряя общности, ограничим рассмотрение алгеброй действий, в которой нагляден физический смысл введенных обобщенных операций. Полученные результаты справедливы и для алгебры целей.

Зададим на алгебре цепочек A некоторое отношение эквивалентности R . Отношение эквивалентности может задаваться как совпадение параметров цепочек (например, длины или используемых операций), либо как совпадение параметров результата, т.е. при одинаковой входной информации в результате выполнения двух разных цепочек получаем результирующую информацию, принадлежащую в обоих случаях к одному некоторому множеству.

Известно, что заданное некоторым образом отношение эквивалентности R разбивает все множество цепочек на множество непересекающихся классов эквивалентности. Исходя из этого, все семантически одинаковые цепочки находятся в пределах одного класса эквивалентности. Классы эквивалентности $\{z_i\}$ характеризуются следующими соотношениями:

$$\{z_i\} : \begin{cases} 1) \forall a_1, a_2 \in z_i, a_1 R a_2, \\ 2) \bigcup_i z_i = A, \\ 3) z_i \cap z_j = \begin{cases} z_i, & i = j, \\ \emptyset, & i \neq j. \end{cases} \end{cases}$$

В каждом классе эквивалентности задается новое отношение эквивалентности, разбивающее каждый класс эквивалентности на подклассы, и т.д. В результате получается семейство алгебр классов эквивалентности

$$A^k = \langle \Sigma^k, \{\odot, \oplus\} \rangle,$$

где Σ^k – множество цепочек над алфавитом $\{z_{jk}^k\}$.

Таким образом, строятся модели декомпозиции целей управления на комплексной предметной области и декомпозиции действий соответствующей автоматизированной системы управления, обеспечивающих достижение этих целей. Они получены абстрагированием от конкретного содержания составляющих предметных областей и заменой их понятием классов эквивалентности функций (целей или действий в зависимости от приложения модели), т.е. множеств функций, эквивалентных в смысле их предметной направленности. В каждом классе эквивалентности задано новое отношение эквивалентности, относящее функции к разным поднаправлениям и разбивающее каждый класс эквивалентности на подклассы. Рекуррентный процесс детализации исходной функции продолжается вплоть до достижения уровня «примитивов» – элементарных функций, неделимых с точки зрения субъекта управления. Тем самым задание множества отношений эквивалентности функций определяет топологию на множестве функций. Базой этой топологии является множество примитивов.

Полученная декомпозиция предметной области представляется древовидным графом иерархии классов, в котором узлы – имена классов, ребра – отношения включения, корень – имя функции на комплексной предметной области, листья – примитивы:

$$\begin{aligned} \{z_{jk}^k\}_{k=1}^K; z_{jk}^k &= \bigcup_{j_{k+1}} z_{j_{k+1}}^{k+1}, \\ z_{jk}^k \cap z_{jk}^k &= \begin{cases} z_{jk}^k, & \mathbf{i}^k = \mathbf{j}^k \\ \emptyset, & \mathbf{i}^k \neq \mathbf{j}^k \end{cases}, \\ \mathbf{j}^k &= (j^k, j_{k+1}), \mathbf{j}^1 = 1, k = \overline{1, K}, \end{aligned} \tag{1}$$

где k – индекс уровня декомпозиции; K – число уровней; \mathbf{j}^k – вектор-индекс длиной k класса эквивалентности на k -м уровне декомпозиции; $j_i (i = \overline{1, K})$ – i -й компонент вектор-индекса; z_{jk}^k – имя класса на k -м уровне декомпозиции с вектор-индексом \mathbf{j}^k . Система (1) порождается системой отношений эквивалентности

$$\begin{aligned} \{R_{jk}^k\}_{k=1}^{k-1} : \forall j_{k+1} \forall x, y, x R_{j_{k+1}}^{k+1} y &\Rightarrow x R_{jk}^k y, \\ \forall \mathbf{j}^k \exists j_{k+1} : x R_{j_{k+1}}^k y &\Rightarrow x R_{j_{k+1}}^{k+1} y, \\ \forall \mathbf{j}^k \forall \mathbf{i}^k : \mathbf{i}^k \neq \mathbf{j}^k : x R_{jk}^k y &\Rightarrow \neg x R_{jk}^k y, \end{aligned}$$

где R_{jk}^k – отношение эквивалентности, разбивающее z_{jk}^k на $\{z_{j_{k+1}}^{k+1}\}, x, y \in z_{jk}^k$. Построенная алгебраическая система A , состоящая из множества элементов, двух алгебраических операций и семейства отношений эквивалентности, является формальной моделью постановки и решения задач организации процесса управления региональной безопасностью, поскольку одинаковым образом описывает цели управления и действия по достижению этих целей на любом уровне декомпозиции исходной задачи.

В общем случае имеется множество классов эквивалентности

$$Z = \{z_{jk}^k\}_{k=1}^K, \tag{2}$$

где K – число уровней декомпозиции; соответственно общая рекуррентная модель представляет собой иерархию алгебр

$$A^k = \langle \Sigma^k, \{\odot, \oplus\} \rangle, \tag{3}$$

гомоморфно отображенных друг на друга «снизу вверх»:

$$\gamma_k : A^{k+1} \rightarrow A^k, \tag{4}$$

где γ_k есть совокупность отношений $\{R_{jk}^k\}$.

Таким образом, построены формальная рекуррентная модель предметной области (региональной безопасности), основанная на рекуррентной декомпозиции целей управления, и модель соответствующей автоматизированной системы управления комплексной безопасностью в этой предметной области, основанная на адекватной декомпозиции целей управления процессе детализации действий по обеспечению региональной безопасности. Построение рекуррентной модели многоуровневой системы позволяет формализовать постановку задачи ее управления, сводящегося к выполнению набора различных примитивов. Таким образом, определяется множество действий системы для достижения поставленной цели управления комплексной безопасностью региона.

Координация управлений в многоуровневых распределенных системах

Процедуры синтеза и анализа многоуровневых иерархических систем предполагают, что составляющие систему элементы обладают ограниченными возможностями по решению задач, стоящих перед системой. В связи с этим глобальная задача, отражающая назначение системы в целом, разбивается на совокупность подзадач таким образом, что решение глобальной задачи эквивалентно решению этой со-

вокупности. Такой подход может применяться как при проектировании структур многоуровневых систем, так и при организации решения системой задач [13, 14]. В многоуровневых иерархических системах при этом возникают специфические проблемы управления.

Из рассмотрения структуры рекуррентной модели (2)–(4) следует, что имеются вполне определенные предпосылки применения к этой модели результатов, полученных для двухуровневых иерархических систем [16]. Действительно, формальная рекуррентная модель получена регулярным рекуррентным применением к процессу декомпозиции основной целевой задачи двухуровневой структуры, имеющей один элемент на верхнем уровне и заданное моделью предметной области число элементов нижнего уровня. Такой простой вид этой (элементарной) модели и регулярные правила построения модели на базе элементарной обеспечивают возможность получения для рекуррентной модели как общих результатов при исследовании вопросов координации, так и конкретных алгоритмов структурно-алгоритмического синтеза. При этом под координацией в настоящей работе понимается свойство системы находить оптимальные решения общей задачи управления при оптимизации подзадач управления, решаемых подсистемами. Другими словами, координирование означает такое воздействие элемента вышестоящего уровня на элементы нижестоящего уровня, которое заставляет нижестоящие элементы действовать согласованно. Для обеспечения координации требуется реализовать определенные ограничения на взаимосвязи между подсистемами.

Управление в многоуровневой системе может быть организовано разными путями в зависимости от степени распределенности общей задачи системы между уровнями. Наиболее методологически простое решение состоит в том, что элемент верхнего уровня (координатор) имеет точное описание поведения элементов нижнего уровня; такая постановка приводит к обычным задачам дискретной оптимизации. Более методологически содержательный подход состоит в формализации задачи координатора с учетом того, что она задается взаимодействием семейства взаимосвязанных подсистем (элементов) нижнего уровня; каждая из подсистем при этом решает свою задачу и преследует свои цели, поэтому координатор должен координировать взаимодействия между элементами нижнего уровня, а не управлять ими; соответственно формализация задачи координатора должна быть основана на информации о том, каким образом элементы нижнего уровня при выборе своих решений учитывают эти взаимодействия. Последний путь позволяет для решения задачи, стоящей перед всей системой в целом, использовать совокупность решающих элементов, расположенных на различных уровнях организации системы, даже если каждый элемент в отдельности (включая и координатора) не в состоянии решить общую задачу. Для решения общая задача разбивается на подзадачи, решение которых производится групповыми усилиями решающих элементов.

Заключение

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Предложено приложение методологических принципов функционально-целевого подхода и теории иерархических многоуровневых систем к задачам анализа и синтеза автоматизированных систем управления региональной безопасностью.
2. Разработана многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем.

Модель обеспечивает основу для автоматизированного синтеза программной исполнительской среды информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в сфере региональной безопасности, а также для решения задач координации в многоуровневых распределенных системах. Модель сможет найти применение при создании методологии математического и компьютерного моделирования многоуровневых иерархических систем управления комплексной безопасностью сложных систем.

Литература

1. Маслобоев А.В. Реализация трансграничных ИТ-проектов в сфере информационного обеспечения комплексной безопасности развития арктических регионов: состояние и перспективы // Информационные ресурсы России. 2014. № 3(139). С. 13–20.
2. Ямалов И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 288 с.
3. Маслобоев А.В. Виртуальные когнитивные центры как интеллектуальные системы для информационной поддержки управления региональной безопасностью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 167–170.
4. Zlatanova S., Peters R., Dilo A., Scholten H. Intelligent Systems for Crisis Management. Springer, 2013. 500 p.
5. Маслобоев А.В. Метод комплексной оценки и анализа глобальной безопасности региональных социально-экономических систем на основе когнитивного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 154–164.

6. Sarbazi-Azad H., Zomaya A.Y. Large Scale Network-Centric Distributed Systems. John Wiley & Sons, 2013. 700 p.
7. Oleynik A., Putilov V. The conceptual modeling for information support of regional management // Applied Information Technology Research. Rovaniemi, Finland, 2007. P. 9–21.
8. Игнатьев М.Б., Путилов В.А., Смольков Г.Я. Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями. М.: Наука, 1986. 232 с.
9. Алексеев В.В., Богатилов В.Н., Палюх Б.В. Приложения метода разделения состояний к управлению технологической безопасностью на основе индекса безопасности. Тверь: ТГТУ, 2009. 398 с.
10. Информационная безопасность систем организационного управления. Теоретические основы. В 2 томах. / Под ред. Н.А. Кузнецов, В.В. Кульбы. М.: Наука, 2006. Т. 1. 496 с.
11. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами. М.: Либроком, 2009. 264 с.
12. Larichev O.I., Petrovsky A.B. Decision support systems for illstructured problems: requirements and constraints // Organizational Decision Support Systems. Amsterdam, North-Holland, 1988. P. 247–257.
13. Кузьмин И.А., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях. Л.: Наука, 1991. 304 с.
14. Mesarovic M.D., Macko D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. NY-London: Academic Press, 1970. 294 p.
15. Шориков А.Ф. Методология моделирования многоуровневых систем: иерархия и динамика // Прикладная информатика. 2006. № 1. С. 136–141.
16. Mesarovic M.D., Takahara Y. General Systems Theory: Mathematical Foundations. NY: Academic Press, 1975. 279 p.

- Маслобоев Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация; заведующий кафедрой, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация, masloboev@iimm.ru
- Путилов Владимир Александрович** – доктор технических наук, профессор, директор, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация; директор, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация, putilov@iimm.ru
- Сютин Алексей Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория системной динамики, факультет географии, Университет Бергена, Берген, N-5020, Норвегия; младший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, Апатиты Мурманской обл., 184209, Российская Федерация, alexei.sioutine@geog.uib.no
- Andrey V. Masloboev** – PhD, Associate professor, senior research fellow, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation; Department head, Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation, masloboev@iimm.ru
- Vladimir A. Putilov** – D.Sc., Professor, Director, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences; Director, Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation
- Alexei V. Sioutine** – PhD, research fellow, University of Bergen, Bergen, N-5020, Norway; junior research fellow, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209, Russian Federation, alexei.sioutine@geog.uib.no

Принято к печати 26.09.14
Accepted 26.09.14