

УДК 004.942

## КООРДИНАЦИЯ В МНОГОУРОВНЕВЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ: ПОДХОД И ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

А.В. Маслобоев<sup>a, b</sup>, В.А. Путилов<sup>a, b</sup>, А.В. Сютин<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация

<sup>b</sup> Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация

<sup>c</sup> Университет Бергена, г. Берген, N-5020, Норвегия

Адрес для переписки: [masloboev@iimm.ru](mailto:masloboev@iimm.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 10.06.14, принята к печати 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 130–138

**Аннотация.** Представлены результаты исследований по разработке методов и средств математического и компьютерного моделирования многоуровневых сетевых систем управления региональной безопасностью. Исследования ведутся в рамках реализации стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года на территории Мурманской области. Предполагается создание единой межведомственной многоуровневой автоматизированной системы мониторинга социально-экономической безопасности арктических регионов России. Отличительными особенностями исследуемого класса систем являются открытость, самоорганизация, децентрализация функций управления и принятия решений, слабая иерархия в контуре принятия решений и способность порождать цели внутри себя. Методы исследования включают функционально-целевой подход, математический аппарат теории иерархических многоуровневых систем, принципы сетецентрического управления распределенными системами с активными компонентами и переменной структурой. В работе решаются задачи согласования и координации локальных решений сетецентрического управления в многоуровневых распределенных системах информационного обеспечения региональной безопасности. Предложены подход к решению и формализация задач координации в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью, основанные на разработанной многоуровневой рекуррентной иерархической модели комплексной безопасности региональных социально-экономических систем. Модель обеспечивает координацию показателей региональной безопасности, оптимизируемых различными элементами многоуровневых систем управления, в условиях децентрализованного принятия решений. Специфика модели заключается в использовании функционально-целевой технологии и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем для реализации процедур согласования локальных решений сетецентрического управления. Результаты работы смогут найти приложение как в задачах координации процессов принятия управленческих решений в многоуровневых сетевых системах управления, используемых в различных предметных областях, так и в задачах анализа и синтеза интегрального показателя комплексной безопасности региональных социально-экономических систем, представляющего собой матрицу показателей региональной безопасности.

**Ключевые слова:** моделирование, координация, многоуровневая система, сетевое управление, информационное обеспечение, 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.

## COORDINATION IN MULTILEVEL NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY: APPROACH AND FORMAL MODEL

A.V. Masloboev<sup>a, b</sup>, V.A. Putilov<sup>a, b</sup>, A.V. Sioutine<sup>a, c</sup>

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

<sup>b</sup> Kola Branch of Petrozavodsk State University, Apatity, 184209, Russian Federation

<sup>c</sup> University of Bergen, Bergen, N-5020, Norway

Corresponding author: [masloboev@iimm.ru](mailto:masloboev@iimm.ru)

**Article info**

Received 10.06.14, accepted 02.12.14  
 doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138  
 Article in Russian

**Reference for citation:** Masloboev A.V., Putilov V.A., Sioutine A.V. Coordination in multilevel network-centric control systems of regional security: approach and formal model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 130–138 (in Russian)

**Abstract.** The paper deals with development of methods and tools for mathematical and computer modeling of the multilevel network-centric control systems of regional security. This research is carried out under development strategy implementation of the Arctic zone of the Russian Federation and national safeguarding for the period before 2020 in the Murmansk region territory. Creation of unified interdepartmental multilevel computer-aided system is proposed intended for decision-making information support and socio-economic security monitoring of the Arctic regions of Russia. The distinctive features of the investigated system class are openness, self-organization, decentralization of management functions and decision-making, weak hierarchy in the decision-making circuit and goal generation capability inside itself. Research techniques include functional-target approach, mathematical apparatus of multilevel hierarchical system theory and principles of network-centric control of distributed systems with pro-active components and variable structure. The work considers network-centric management local decisions coordination problem-solving within the multilevel distributed systems intended for information support of regional security. The coordination problem-solving approach and problem formalization in the multilevel network-centric control systems of regional security have been proposed based on developed multilevel recurrent hierarchical model of regional socio-economic system complex security. The model provides coordination of regional security indexes, optimized by the different elements of multilevel control systems, subject to decentralized decision-making. The model specificity consists in application of functional-target technology and mathematical apparatus of multilevel hierarchical system theory for coordination procedures implementation of the network-centric management local decisions. The work-out and research results can find further application both within the coordination problem-solving of managerial decision-making in the multilevel network-centric control systems used for different subject domains, and within the analysis and synthesis problem-solving of integral complex security index of the regional socio-economic system, represented as regional security index matrix.

**Keywords:** modeling, coordination, multilevel system, network-centric control, information support, 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 Arctic zone of the Russian Federation development"). The authors enclose gratitude to their lab colleagues for assistance and participation within the comprehensive discussion of the research results.

### Введение

На сегодняшний день информационная поддержка управления региональной безопасностью в Арктической зоне Российской Федерации в соответствии с пунктом 107 «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации на период до 2020 года» осуществляется за счет формирования единого информационного поля межведомственной деятельности с использованием системы распределенных ситуационно-кризисных центров. Интегрируемые в рамках этого поля организационно разнородные компоненты ведомственных информационных систем предназначены, главным образом, для поддержки принятия управленческих решений в разнотипных чрезвычайных и кризисных ситуациях на различных уровнях управления региональной безопасностью – стратегическом, тактическом и оперативном. Система информационного обеспечения региональной безопасности, построенная на базе сети распределенных ситуационно-кризисных центров, относится к классу многоуровневых сетцентрических систем управления с активными элементами и переменной структурой.

К данному классу относится большинство современных интегрированных систем управления комплексной безопасностью сложных объектов в социально-экономической, природно-промышленной, технической и других сферах. Реальными проектами таких систем, разрабатываемых для задач управления развитием и безопасностью Арктической зоны Российской Федерации, являются [1]: система VarentsWatch (разработчик Kongsberg Spacetec AS, Норвегия), Комплексная система освещения обстановки в Арктике (разработчик ОАО «Концерн РТИ Системы», Россия), Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (разработчик ВНИИГМИ-НЦ Росгидромета, Россия), Единая национальная диспетчерская служба Арктики (разработчик Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Россия), а также Единая межведомственная многоуровневая автоматизированная система мониторинга общественной (социальной) безопасности региона (разработчики Государственная корпорация «Ростехнологии», ЗАО «Российская корпорация средств связи», Россия). Некоторые из этих систем и их компоненты реализованы в виде готовых прототипов. Эти системы ориентированы в основном на решение частных задач информационного обеспечения различных видов безопасности компонентов региональных систем – например, в сферах, связанных с метеорологией, энергетикой, морской деятельностью, образованием, транспортной логистикой или экологией.

Такие системы управления распределенными объектами (отдельными системами), согласно работам [2, 3], характеризуются свойствами открытости, самоорганизации, децентрализации функций управления и принятия решений, слабой иерархии в контуре принятия решений и способностью порождать цели внутри себя. Центральной задачей для данного класса систем является согласование и координация взаимодействия входящих в их состав подсистем в условиях децентрализованного управления и принятия решений. Главная задача координации [4] – достижение согласованности в работе всех звеньев системы путем установления рациональных связей (коммуникаций) между ними. Характер этих связей может быть различным, так как зависит от координируемых процессов.

В настоящее время разработаны различные модификации методов координации управлений и согласования локальных решений, принимаемых на разных уровнях управления, в многоуровневых сетевых системах управления. К ним относятся игровые и градиентные методы [5], основанные на предложенных в [6] необходимых и достаточных условиях координируемости локально организованной иерархии динамических систем; методы координации, основанные на принципах самоорганизации на базе моделей вычислительных полей [7]; методы нечеткой параметрической координации в многоуровневых иерархических системах [8]; методы координации путем прогнозирования и развязывания взаимодействий [6, 9, 10]; методы координации на основе моделей коалиционных рефлексивных игр [11]; мультиагентный, триадный, ситуационный подходы [12] к моделированию координации сложных динамических систем и другие.

Настоящая работа продолжает исследования, представленные в работе [13]. Для сетевых систем управления региональной безопасностью разработана многоуровневая рекуррентная иерархическая модель комплексной безопасности региональных социально-экономических систем. Специфика модели заключается в использовании функционально-целевой технологии и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем для реализации процедур согласования локальных решений сетевых систем управления. Модель обеспечивает координацию показателей региональной безопасности, оптимизируемых различными элементами многоуровневых систем управления, в условиях децентрализованного принятия решений.

Далее представлены подход к решению и формализация задач координации в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью, основанные на предложенной в [13] многоуровневой рекуррентной модели иерархического управления.

#### Координация в многоуровневой системе: формализация и постановка задачи

В настоящей работе под координацией понимается свойство системы находить оптимальные решения общей задачи управления при оптимизации подзадач управления, решаемых подсистемами. Другими словами, координация 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.

В работе [13] предложена формальная рекуррентная модель предметной области, представляющая собой иерархию алгебр и основанная на рекуррентной декомпозиции целей управления:

$$Z = \{z_{jk}^k\}_{k=1}^K, \quad (1)$$

$$A^k = \langle \Sigma^k, \{\odot, \oplus\} \rangle, \quad (2)$$

$$\gamma_k : A^{k+1} \rightarrow A^k, \quad (3)$$

где  $Z$  – множество классов эквивалентности;  $K$  – число уровней декомпозиции;  $k$  – индекс уровня декомпозиции;  $\mathbf{j}^k = \{j_i\}$ ,  $i = \overline{1, K}$  – вектор-индекс длиной  $k$  класса эквивалентности на  $k$ -ом уровне декомпозиции;  $j_i$  –  $i$ -й компонент вектор-индекса;  $z_{jk}^k$  – имя класса на  $k$ -ом уровне декомпозиции с вектор-индексом  $\mathbf{j}^k$ ;  $\gamma_k$  – совокупность отношений  $\{R_{jk}^k\}$ ;  $R_{jk}^k$  – отношение эквивалентности, разбивающее  $z_{jk}^k$  на  $\{z_{jk+1}^{k+1}\}$ ,  $x, y \in z_{jk}^k$ ;  $\Sigma^k$  – множество цепочек над алфавитом  $\{z_{jk}^k\}$ .

Для формализации понятия координации в работе [6] вводится предикат  $P(x, D)$ :

$$(\forall x, \forall D), [P(x, D) \equiv x \text{ есть решение } D],$$

где  $D$  – произвольная решаемая задача. Предикат  $P(x, D)$  является истинным тогда и только тогда, когда  $D$  – решаемая задача, а  $x$  – одно из ее решений.

Пусть задачи, решаемые нижестоящими элементами, параметризуются только координирующими сигналами элемента вышестоящего уровня (рис. 1). Пусть  $D_0$  – конкретная задача вышестоящего элемента. Каждый координирующий сигнал  $\gamma \in \Gamma$  ( $\Gamma$  – множество координирующих сигналов) вышестоящего элемента конкретизирует задачу  $D_i(\gamma)$ , которую будет решать  $i$ -й элемент нижестоящего уровня. Пусть  $\overline{D}(\gamma) = \{D_1(\gamma), \dots, D_n(\gamma)\}$  – совокупность таких задач (здесь  $n$  – число элементов нижестоящего уровня). Задачи, решаемые элементами нижестоящего уровня, координируемы по отношению к задаче  $D_0$  вышестоящего уровня тогда и только тогда, когда справедливо предложение

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\gamma, D_0)], \gamma \in \Gamma, x \in X, \quad (4)$$

т.е. когда имеет решение задача  $D_0$  вышестоящего уровня и для координирующего сигнала  $\gamma$ , решающего данную задачу, имеется множество решений  $\overline{D}_i(\gamma)$  задач нижестоящих элементов.

Предложению (4) эквивалентно следующее предложение:

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } Q_0(\gamma, x)], \quad (5)$$

вследствие того, что справедливо утверждение  $P(\gamma, D_0) \Leftrightarrow (\exists x)[Q_0(\gamma, x)]$ , где  $Q_0$  – заданный предикат, определенный для всех пар:  $(\gamma, x) : (\gamma, x) \in \Gamma \times X; x = X_1 \times \dots \times X_n$ .

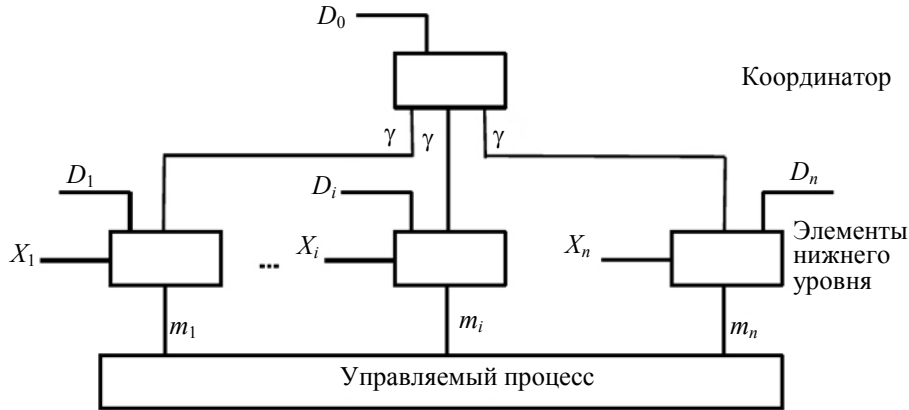


Рис. 1. Структура двухуровневой иерархической модели управления

Общая (глобальная) задача системы определяется по отношению ко всему управляемому системой процессу в целом, поэтому множество решений этой задачи есть множество глобальных управлений  $M$ . Будем рассматривать случай, когда глобальные управляющие сигналы из множества  $M$ , воздействующие на управляемый процесс в целом, исходят только из элементов нижнего уровня. Тогда эти сигналы представляются отображением  $\pi_M : X \rightarrow M$ . Задачи, решаемые элементами нижестоящего уровня, координируемы по отношению к данной глобальной задаче  $D$  тогда и только тогда, когда справедливо предложение

$$(\exists \gamma)(\exists x), [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\pi_M(x), D)], \gamma \in \Gamma, x \in X, \quad (6)$$

т.е. элемент вышестоящего уровня имеет возможность влиять на элементы нижестоящего уровня таким образом, что их результирующее воздействие на управляемый процесс в целом дает решение глобальной задачи системы.

Рассмотрим совместимость в многоуровневых системах на примере двухуровневой системы [14], в которой имеются задачи трех типов: глобальная, для элемента вышестоящего уровня, для элементов нижестоящего уровня. Эти задачи должны быть определенным образом согласованы между собой (совместимы). Для совместимости задач координация задач  $D_i, i = \overline{1, n}$ , элементов нижестоящего уровня относительно задачи  $D_0$  вышестоящего уровня должна быть соответствующим образом связана с глобальной задачей  $D$ . Постулат совместимости [6]:

$$(\forall \gamma)(\forall x), \{ [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } Q_0(\gamma, x)] \Rightarrow [P(x, \overline{D}(\gamma)) \text{ и } P(\pi_M(x), D)] \}, \\ x \in X, \gamma \in \Gamma, D = \{D_i\}_{i=1}^n, \quad (7)$$

т.е. решаемые элементами нижестоящего уровня задачи  $D_i, i = \overline{1, n}$  скоординированы относительно глобальной задачи  $D$  всякий раз, когда задачи  $D_i, i = \overline{1, n}$  скоординированы относительно задачи  $D_0$  решаемой элементом вышестоящего уровня. Если постулат (7) выполняется, задачи совместимы. Если задачи совместимы, то решение глобальной задачи  $D$  достигается тогда, когда элемент вышестоящего уровня координирует элементы нижестоящего уровня по отношению к решению собственной задачи.

### Координация путем развязывания взаимодействий

При использовании способа координации путем развязывания взаимодействий успех в координации элементов нижестоящего уровня можно оценить, исходя из степени рассогласованности между фактическими взаимодействиями элементов нижестоящего уровня и теми, которые были бы желательны с точки зрения этих элементов. Связующие сигналы, выбираемые элементами нижестоящего уровня, задаются отображением  $\pi_U : X \rightarrow U$ , т.е.  $u \in U$  – это часть решения  $x \in X$ . Принцип согласования взаимодействий дается предложением [6]:

$$(\forall \gamma)(\forall x), \{ [P(x, D(\gamma)) \text{ и } K(\pi_M(x)) = \pi_U(x)] \Rightarrow P(\pi_M(x), D) \}, \\ \gamma \in \Gamma, x \in X, D = \{D_i\}_{i=1}^n. \quad (8)$$

Принцип (8) утверждает, что управляющее воздействие  $m = \pi_M(x)$  на управляемый процесс решает поставленную глобальную задачу  $D$  тогда, когда  $x$  является решением задач  $D_i, i = \overline{1, n}$  элементов

нижестоящего уровня и желаемые связующие сигналы  $u^j = \pi_U(x)$  совпадают (согласованы) с фактическими связующими сигналами  $u = K(m)$  ( $K : U \rightarrow M$ ), имеющими место тогда, когда к процессу приложено управляющее воздействие  $m = \pi_M(x)$ . Другая форма записи принципа согласования взаимодействий [6]:

$$(\forall \gamma) (\forall x), \{ [P(x, D(\gamma)) \text{ и } q(\gamma, x) = \tilde{q}(\gamma, x)] \Rightarrow P(\pi_M(x), D) \},$$

$$\gamma \in \Gamma, x \in X, D = \{D_i\}_{i=1}^n, \tag{9}$$

где  $\tilde{q}$  и  $q$  – заданные функции, отображающие множество  $\Gamma \otimes X$  на числовую ось и используемые для оценки точности согласования между фактическими и желаемыми связующими сигналами элементов нижестоящего уровня.

Таким образом, стремление использовать весьма интуитивно полезные для решения сложных задач возможности, заложенные в структуре многоуровневых иерархических систем приводит к необходимости решать дополнительные задачи координации в таких системах.

**Координация в многоуровневой системе на базе рекуррентной модели**

Перейдем к анализу многоуровневых иерархических систем. Введем некоторые дополнительные обозначения. Для многоуровневой системы (1)–(3) не будем специально выделять множество управляющих воздействий  $M$ , а будем предполагать, что на каждом уровне  $k$  системы (1)–(3) для каждого класса эквивалентности  $z_j^k$  ( $j$ -го элемента  $k$ -го уровня) имеется множество  $F_j^k$ . Соответственно для всей модели (1)–(3) имеется множество  $\Gamma = \{ \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k} \}_{k=1}^K$ .

Элементами множества  $\Gamma_j^k$  являются координирующие воздействия  $\gamma_j^k$ . Пусть  $\Gamma^k = \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k}$ . При этом на нижнем уровне ( $k = K$ ):  $\Gamma^k = \{ \Gamma_j^k \}_{j=1}^{N_k} \leftrightarrow M$ .

В соответствии с приведенной формализацией уровень  $k=2$  порождает  $N_2$  двухуровневых систем, уровень  $k = i - N_i$  двухуровневых систем и, соответственно, уровень  $k = K - 1 - N_{K-1}$  систем (рис. 2).

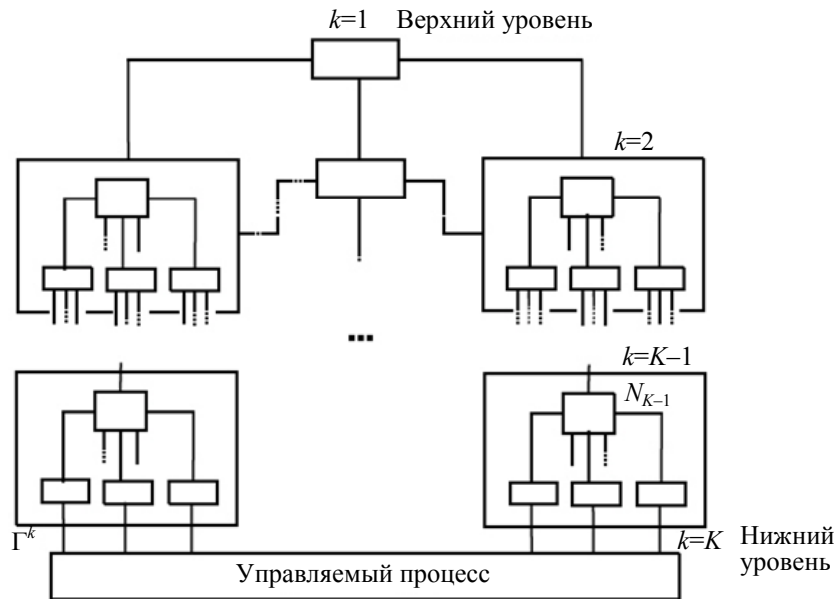


Рис. 2. Структура многоуровневой рекуррентной иерархической модели управления

Пусть множество управляющих воздействий представимо в виде

$$\Gamma^k = \Gamma_1^k \times \dots \times \Gamma_{N_k}^k.$$

Предположим, что  $j$ -й класс эквивалентности  $k$ -го уровня системы (1)–(3) связан с определенным набором классов эквивалентности  $(k+1)$ -го уровня, т.е. на  $(k+1)$ -ом уровне  $N_{k+1}$  классов эквивалентности собраны в  $N_k$  групп, связанных отношениями эквивалентности с  $N_k$  классами эквивалентности уровня  $k$ . Каждая такая группа представляет собой двухуровневую систему  $S_j^k$ , порождаемую каждым классом эквивалентности  $z_j^k$ :

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}) (\forall k, k = \overline{1, K-1}) z_j^k \rightarrow S_j^k. \tag{10}$$

Общее число таких двухуровневых систем

$$N_S = \sum_{k=1}^{K-1} N_k.$$

Группирование (10) по элементам вышестоящих уровней отражено в [13] введением вектор-индекса. Далее для упрощения записи вектор-индексы опускаются. Предполагается, что все координирующие воздействия, согласующие сигналы, локальные функции качества и т.д., рассматриваемые для определенного уровня двухуровневой системы (1)–(6), группируются по элементам этого уровня в соответствии с заданными отношениями эквивалентности.

Пусть связующие сигналы на  $k$ -ом уровне системы (1)–(3) определяются посредством отображения  $Q_k: \Gamma^k \rightarrow U^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , где  $U^k$  – множество связующих сигналов на уровне  $k$ .

Глобальная задача оптимизации  $D$  отражает глобальную цель многоуровневой системы и определяется парой  $(g, \Gamma^k)$ , где  $g$  – заданная целевая функция. Решением задачи  $D$  является такое воздействие  $\hat{\gamma}^k$  на нижнем уровне  $K$  системы, что

$$g(\hat{\gamma}^k) = \min_{\Gamma^k} g(\gamma^k), \quad \hat{\gamma}^k \in \Gamma^k.$$

Пусть  $D_j^k$  – задача, решаемая  $j$ -м элементом  $k$ -го уровня системы (1)–(3). Задачи, решаемые на этом уровне, также будут оптимизационными. Локальная оптимизационная задача  $D_j^k(\gamma)$  ( $\gamma \in \Gamma_j^{k-1}$ ,  $j = \overline{1, N_{k-1}}$ ,  $k = \overline{2, K}$ ) определяется парой  $(g_{j\gamma}^k, X_{j\gamma}^k)$ , где  $g_{j\gamma}^k$  – заданная локальная целевая функция, определенная на множестве решений  $X_j^k$ , а  $X_{j\gamma}^k$  – заданное подмножество  $X_j^k$ , причем  $X_{j\gamma}^k = \Gamma_j^k \times U_j^k$ ,  $j = \overline{1, N_k}$ ,  $k = \overline{2, K}$ .

Решением локальной задачи  $D_j^k(\gamma)$  является элемент  $x_j^{k\gamma} \in X_{j\gamma}^k$ , такой, что

$$g_{j\gamma}^k(x_j^{k\gamma}) = \min_{X_{j\gamma}^k} g_{j\gamma}^k(x_j^k), \quad x_j^k \in X_{j\gamma}^k; \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K}.$$

Имеются два способа воздействия на локальные задачи оптимизации [6]: через локальные целевые функции  $g_{j\gamma}^k$ , или локальные функции качества  $G_{j\gamma}^k$  (координация путем изменения целей) и через множество допустимых решений  $X_{j\gamma}^k$  (координация путем изменения ограничений). При координации путем изменения целей задаются функции

$$G_{jB}^k: \Gamma_j^k \times U_j^k \times B^k \rightarrow V, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K},$$

где  $B$  – заданное множество;  $V$  – множество платежей. Пусть каждому  $\gamma_j^{k-1}$ ,  $\gamma_j^{k-1} \in \Gamma^{k-1}$  приписано свое (единственное)  $\beta_j^{k\gamma} \in B^k$ . Тогда из  $G_{jB}^k$  получается локальная функция качества

$$G_{j\gamma}^k(\gamma_j^k, u_j^k) = G_{jB}^k(\gamma_j^k, u_j^k, \beta_j^{k\gamma}), \quad j = \overline{1, N_k}, \quad k = \overline{2, K}.$$

При координации путем изменения ограничений каждый координирующий сигнал  $\gamma_j^{k-1} \in \Gamma^{k-1}$  ( $k-1$ )-го уровня определяет для конкретного  $j$ -го локального элемента  $k$ -го уровня множество допустимых решений  $X_{j\gamma}^k$ , которое в нашем случае является подмножеством множества  $\Gamma_j^k \times U_j^k$ . Множества  $X_{j\gamma}^k$  представляют собой ограничения, накладываемые на локальные решения. Пусть  $X_{j\gamma}^k = \Gamma_j^k \times U_j^{k\gamma}$ , где  $U_j^{k\gamma}$  – заданное подмножество  $U_j^k$ . Тогда координация сводится к выбору соответствующих подмножеств связующих сигналов.

Из рассмотренных способов координирования в нашем случае следует использовать координирование путем развязывания взаимодействий. Действительно, при решении задачи оптимизации на формальной рекуррентной модели нужно выбирать в классах эквивалентности представителей, имеющих определенные характеристики (связующие сигналы), влияющие на суммарные характеристики совокупностей таких представителей, входящих в «формулы эксперимента». В общем случае прогнозировать предварительно точные значения этих характеристик или диапазонов их изменения – сложная задача, решение которой может быть основано в некоторых частных случаях на априорных знаниях о зависимости суммарных характеристик от характеристик конкретных представителей классов эквивалентности. В связи с этим наиболее общим и естественным для решения нашей задачи является координирование путем развязывания взаимодействий.

При этом  $\forall \gamma_j^k, U_j^{k\gamma} = U_j^k$ ,  $j = \overline{1, N_k}$ ,  $k = \overline{2, K}$ , и, следовательно,  $X_{j\gamma}^k = X_j^k = \Gamma_j^k \times U_j^k$ ,  $j = \overline{1, N_k}$ ,  $k = \overline{2, K}$ , т.е. локальные оптимизационные задачи формулируются для решения независимо друг от друга, и каждый локальный элемент должен выбирать оптимальным образом не только координирующие сигналы для элементов нижележащего уровня, связанных с ним отношениями эквивалентности, но и локальные связующие сигналы.

Многоуровневая система (1)–(3) координируема, если истинно следующее предложение:

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\exists \gamma^{k-1})(\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k) : [\pi(x^{k\gamma}) = \hat{\gamma}^k], \quad (11)$$

где  $\hat{\gamma}^k$  – глобально оптимальное координирующее воздействие на нижнем уровне системы;  $x^{k\gamma} = (\gamma^{k\gamma}, u^{k\gamma})$ , так что каждая пара  $(\gamma^{k\gamma}, u^{k\gamma})$  является оптимальной;  $\pi : \Gamma^k \times U^k \rightarrow \Gamma^k$ .

В (11) утверждается, что система координируема, если для каждой подсистемы  $S_j^k, j = \overline{1, N}, k = \overline{1, K-1}$ , существует координирующий сигнал  $\gamma^k \in \Gamma^k$  и локальные оптимальные решения  $(\gamma_j^{(k+1)\gamma}, u_j^{(k+1)\gamma})$  для элементов нижнего уровня подсистемы  $S_j^k$  такие, что координирующий сигнал  $\gamma^{k\gamma} = (\gamma_1^{k\gamma}, \dots, \gamma_N^{k\gamma})$  является глобально оптимальным, т.е.  $\gamma^{k\gamma} = \hat{\gamma}^k$ .

Задачей любого элемента вышестоящего уровня в каждой подсистеме  $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$ , является выработка оптимального координирующего сигнала. Каждая из этих задач должна быть сформулирована таким образом, чтобы ее решение являлось искомым оптимальным координирующим воздействием на элементы нижнего уровня подсистемы  $S_j^k$ . При формализации этих задач целесообразно использовать постулат совместимости (7) и принципы координации [6], из которых мы выбрали принцип согласования. Принцип согласования взаимодействий (8), (9) для многоуровневой системы (1)–(3) с учетом проведенной формализации выражается следующим предложением:

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma_j^{k-1}), (\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k): \\ \{[(\gamma^k, u^k) = x^{k\gamma} \text{ и } L^k(\gamma^k) = u^k] \Rightarrow (\gamma^k = \hat{\gamma}^k)\}, \quad (12)$$

где  $L^k = \Gamma^k \rightarrow U^k$ . Предложением (12) утверждается, что глобально оптимальное координирующее воздействие обеспечивается локальными решениями всякий раз, когда для каждой подсистемы  $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$ , связующие сигналы для элементов нижнего уровня согласованы.

При использовании принципа согласования функции качества сравниваются локальные затраты (функции качества), а не связующие сигналы. Пусть

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma^{k-1}, \gamma^{k-1} \in \Gamma^{k-1}), (\exists g_{j\gamma}^k : \Gamma^k \times U^k \rightarrow V): \\ [g_{j\gamma}^k(\gamma^k, u^k) = (g_{1\gamma}^k(\gamma_1^k, u_1^k), \dots, g_{j_k}^k(\gamma_{j_k}^k, u_{j_k}^k))] \quad (13)$$

где  $j_k$  – число элементов нижнего уровня в подсистеме  $S_j^{k-1}$ . С учетом (13) принцип согласования функций качества

$$(\forall j, j = \overline{1, N_k}), (\forall k, k = \overline{2, K}), (\forall \gamma_j^{k-1}), (\exists x^{k\gamma})(\exists \hat{\gamma}^k) : \{[(\gamma^k, u^k) = x^{k\gamma} \text{ и } \bar{g}_{j\gamma}^k(\gamma^k, L^k(\gamma^k)) = \bar{g}_{j\gamma}^k(\hat{\gamma}^k, L^k(\hat{\gamma}^k))] \Rightarrow \gamma^k = \hat{\gamma}^k\}, \quad (14)$$

т.е. глобально оптимальное координирующее воздействие обеспечивается локальными решениями всякий раз, когда согласованы ожидаемые и фактические локальные затраты для каждой подсистемы  $S_j^k, j = \overline{1, N_k}, k = \overline{1, K-1}$ . Выражениями (12), (14) определены принципы согласования взаимодействий и функций качества для многоуровневой системы (1)–(3).

При оптимизации элементами многоуровневой системы локальных целевых функций могут возникнуть конфликты (несогласованность) между локальными решениями [15, 16]. Принципы координации обеспечивают отсутствие конфликтов, если при оптимизации локальных целевых функций обеспечиваются условия согласования. Эти условия, в свою очередь, обеспечиваются, если система обладает определенными свойствами, определяемыми через взаимосвязи между целевыми функциями.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают координируемость систем, представленных введенной рекуррентной моделью, при удовлетворении специальных (но довольно общих) требований взаимосвязи между показателями качества (целевыми функциями), оптимизируемыми различными элементами многоуровневых систем. Приведенные подходы и результаты исследований координации демонстрируют пути и методы решения подобных задач анализа систем такого класса.

### Заключение

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ подходов к решению задач координации управлений в многоуровневых системах с иерархической и сетевой структурой.
2. Предложена формализация задачи координации управлений в многоуровневых распределенных системах, предназначенных для информационной поддержки принятия решений в сфере обеспечения региональной безопасности.
3. На базе разработанной рекуррентной модели [13] и принципов координации [6] предложен подход к решению задач внутриуровневой и межуровневой координации в многоуровневых распределенных системах. 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.

Результаты работы смогут найти приложение в задачах координации принятия управленческих решений в многоуровневых сетевых системах информационной поддержки межведомственной деятельности в сфере региональной безопасности, характеризующихся организационной и технологической разнородностью, распределенностью и децентрализацией функций управления.

### References

1. Masloboev A.V. Realizatsiya transgranichnykh IT-proektov v sfere informatsionnogo obespecheniya kompleksnoi bezopasnosti razvitiya arkticheskikh regionov: sostoyanie i perspektivy [Transfrontier IT-projects implementation in the field of global security information support of the arctic region development]. *Informatsionnye Resursy Rossii*, 2014, no. 3 (139), pp. 13–20.
2. Sarbazi-Azad H., Zomaya A.Y. *Large Scale Network-Centric Distributed Systems*. NY, John Wiley & Sons, 2013, 700 p. doi: 10.1002/9781118640708
3. Efremov A.Yu., Maksimov D.Yu. Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvaetsya v eto ponyatie? [Network-centric control system - that is embedded in this concept]. *Trudy Tre'tei Rossiiskoi Konferentsii Tekhnicheskie i Programmnye Sredstva Sistem Upravleniya, Kontrolya i Izmereniya* [Proc. 3<sup>rd</sup> Russian Conf. Technical and Software Control Systems, Control and Measurement]. Moscow, IPU RAN Publ., 2012, pp. 158–161.
4. Fridman O.V., Fridman A.Ya. Primenenie neironnykh setei dlya detektirovaniya istochnika vozmushchenii v setevykh strukturakh [Usage of neural networks to detect disturbing nodes in network systems]. *Trudy Instituta Sistemnogo Analiza RAN*, 2013, vol. 63, no. 2, pp. 45–53.
5. Fridman A., Fridman O. Gradient coordination technique for controlling hierarchical and network systems. *Systems Research Forum*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 121–136. doi: 10.1142/S1793966610000223
6. Mesarovic M.D., Macko D., Takahara Y. *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*. NY-London, Academic Press, 1970, 294 p.
7. Gorodetskii V.I. Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 256–281. doi: 10.1134/S106423071201008X
8. Zaporozhetses B.B., Novoseltsev V.I. Strukov A.Yu. Nechetkaya parametricheskaya koordinatsiya v mnogourovnevnoi ierarkhicheskoi sisteme [Indistinct parametrical coordination in multilevel hierarchical system]. *Sistemy Upravleniya i Informatsionnye Tekhnologii*, 2012, vol. 50, no. 4.1, pp. 142–145.
9. Kuz'min I.A., Putilov V.A., Fil'chakov V.V. *Raspredeleonnaya Obrabotka Informatsii v Nauchnykh Issledovaniyakh* [Distributed Data Processing in Scientific Researches]. Leningrad, Nauka Publ., 1991, 304 p.
10. Stoilov T., Stoilova K. Goal and predictive coordination in two level hierarchical systems. *International Journal of General Systems*, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 181–213. doi: 10.1080/03081070601143141
11. Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. *Refleksivnye Iгры* [Reflexive Games]. Moscow, SINTEG, 2003, 160 p.
12. Yuditskiy S.A., Vladislavlev P.N., Toch D.S. Triadnyi podkhod k modelirovaniyu sistem setetsentricheskogo upravleniya [A triad approach to network-centric control systems modelling]. *Upravlenie Bolsimi Sistemami*, 2010, no. 28, pp. 24–39.
13. Masloboev A.V., Putilov V.A., Sioutine A.V. Mnogourovnevaya rekurrentnaya model' ierarkhicheskogo upravleniya kompleksnoi bezopasnost'yu regiona [Multilevel recurrent model for hierarchical control of complex regional security]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 6 (94), pp. 163–170.
14. Findeisen W. *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. NY, John Wiley & Sons, 1980, 478 p.
15. Makarov A.A. *Metody i Modeli Soglasovaniya Ierarkhicheskikh Reshenii* [Methods and Models Matching of Hierarchical Solutions]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 237 p.
16. Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. *Vychislitel'nye Metody Issledovaniya i Proektirovaniya Slozhnykh System* [Computing Methods of Complex Systems Research and Design]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 288 p.

**Маслобоев Андрей Владимирович**

– кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация; заведующий кафедрой, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская 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, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация; директор, Кольский филиал



- Сютин Алексей Викторович* – Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Российская Федерация, putilov@iimm.ru  
 кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет Бергена, г. Берген, N-5020, Норвегия; младший научный сотрудник, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Мурманская 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, putilov@iimm.ru
- 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