

УДК 004.052, 004.75, 004.89, 004.942

**ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЙ НАДЕЖНОСТИ МНОГОАГЕНТНЫХ  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ****А.В. Маслобоев, В.Н. Богатиков**

Разработана технология оценки состояний надежности многоагентных распределенных информационных систем, основанная на использовании нечеткой марковской модели, узлами которой являются интегральные показатели надежности. В качестве показателя используется оценка, получаемая как степень нечеткого равенства текущей ситуации, которая описывается системой показателей надежности, ситуации, соответствующей области безопасного функционирования системы. Технология позволяет определить распределение в системе информационных и аппаратных ресурсов, обеспечивающее требуемый уровень надежности.

**Ключевые слова:** технология, моделирование, оценка состояний надежности, распределенные информационные системы, нечеткая марковская модель, многоагентные системы.

**Введение**

Надежность функционирования информационно-коммуникационных систем (ИКС) является одним из основных условий их эффективного применения при решении задач управления функционированием и развитием социально-экономических систем различного уровня. Особое значение надежность ИКС приобретает при управлении территориями, которые характеризуются экстремальными природно-климатическими условиями и очаговой хозяйственной деятельностью.

Территориальная компьютерная сеть Арктических регионов Российской Федерации (РФ) может быть представлена как ассоциация территориально рассредоточенных вычислительных комплексов различного типа и назначения, взаимодействующих друг с другом через коммуникационную подсеть – сеть передачи данных – с целью предоставления пользователям, независимо от их месторасположения, услуг по хранению, передаче и обработке информации, а также обеспечения доступа к информационным и вычислительным ресурсам компьютерной сети. Разнородность региональных факторов компонентов ИКС, на которые они оказывают влияние, и характеристик влияния существенно осложняют построение формальной модели оценки надежности ИКС в Арктической зоне РФ. Для разработки этой модели был проведен концептуальный анализ особенностей Арктической зоны, влияющих на характеристики надежности ИКС. Выделены четыре группы факторов различной природы:

- геофизические (солнечный ветер, вертикальная компонента межпланетного магнитного поля, солнечная радиация);
- природно-климатические (температура, давление, влажность воздуха, скорость перемещения воздушных масс, фотопериодический режим);
- социально-экономические (ресурсное обеспечение компонентов сложной информационной системы – кадры, энергетика, оборудование и системы управления);
- территориально-географические (географическое расположение, условия рельефа и др.).

Необходимо отметить, что степень надежности технических средств обеспечения информационных систем в Арктическом регионе практически не изучена. Вместе с тем показано, что солнечная активность и обусловленные ею геомагнитные возмущения влияют на распространение радиоволн и в период геомагнитных возмущений создают серьезные помехи для радиосвязи. В Арктическом регионе, где радиосвязь в отдельных ситуациях является единственным средством коммуникации, такие помехи могут приводить к роковым последствиям. И именно в Арктическом регионе, в силу широтных особенностей строения магнитосферы и ионосферы Земли, помехи в радиосвязи в период геомагнитных возмущений наиболее выражены. Кроме того, в высоких широтах отмечается и наибольшее число сбоев в работе технических систем и информационного обеспечения. Эти сбои могут быть вызваны широтным возрастанием интенсивности космических лучей, порождающих ошибки в работе компьютерных систем и программного обеспечения.

Учитывая возрастание в последние годы интереса мирового сообщества к Арктическим территориям, возросла актуальность решения задач повышения уровня системной надежности в рамках формирования единых виртуальных информационных пространств (ЕВИП) Арктических регионов. Под ЕВИП понимается целостная информационно-аналитическая среда, представляющая собой комплекс проблемно-ориентированных, взаимоувязанных и взаимодействующих информационных и аналитических ресурсов, а также технологическую и организационную инфраструктуру их создания и использования [1]. Ввиду разнородности компонентов, составляющих ЕВИП, решение задачи оценки и управления его надежностью представляется сложной проблемой, требующей комплексного решения.

В качестве технологической платформы для практической реализации и развертывания открытых расширяемых многофункциональных ЕВИП предлагается использовать современные технологии одно-ранговых мультиагентных распределенных информационных систем [2] и принципы сетевидного управления [3]. Использование технологии мультиагентных систем (МАС) [4] позволяет создать адекватную информационно-аналитическую среду поддержки управления развитием Арктических регионов, учитывая распределенность, динамичность и структурную сложность образующих их подсистем. При таком подходе представляется возможность реализовать виртуализацию функций управления отдельными аспектами регионального развития за счет делегирования их интеллектуальным про-активным агентам, а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов можно будет обеспечить эффективное функционирование самоорганизующегося ЕВИП и его компонентов. Под агентом в данном случае понимается аппаратная или программная сущность, действующая либо от лица пользователя, либо от лица системы, делегировавшей агенту полномочия на выполнение тех или иных действий в интересах достижения целей при решении пользовательских задач [5].

Актуальность исследований в области МАС, согласно работам [6, 7], определяется сложностью современных организационных и технических систем, разнообразием, сложностью и распределенностью решаемых задач, огромными объемами потоков информации и высокими требованиями к времени ее обработки. Теоретические исследования в области МАС ведутся в основном по следующим направлениям: теория агентов; коллективное поведение агентов; архитектура агентов и МАС; методы, языки и средства коммуникации агентов; языки реализации агентов; средства поддержки миграции агентов по сети. Анализ современного состояния исследований отечественных и зарубежных научных школ в рассматриваемой проблемной области показал, что вопросы обеспечения надежности технических и организационных компонентов мультиагентных информационных систем и создаваемых на их основе агентно-ориентированных ЕВИП мало изучены. Проблема моделирования и оценки состояний для обеспечения надежности МАС и мультиагентных ЕВИП на основе исследования структур и механизмов проявления разнородных потенциальных опасностей является важной фундаментальной задачей, которую необходимо решать при разработке МАС и ЕВИП, ориентированных на использование в различных областях. Следует также отметить, что получение комплексной оценки надежности МАС зависит от оценок состояний образующих МАС компонентов, в частности, агентов, которые сами по себе являются самостоятельными интеллектуальными системами. В связи с этим моделирование и оценка надежности агентов является отдельной задачей.

Наряду с технической компонентой надежности работы мультиагентных информационных систем, человеческий фактор также влияет на их надежность. От психофизиологического состояния пользователя-оператора во многом зависит своевременность и правильность принятия решений и, следовательно, надежность работы информационных систем. Исследования последних лет показали, что вариации геомагнитного поля, также как и интенсивность космических лучей, существенно модулируют психофизиологическое состояние человека. Другими словами, для комплексной оценки степени надежности работы используемых в Арктических регионах проблемно-ориентированных мультиагентных информационных систем необходимо учитывать также и состояние пользователя-оператора.

Работа посвящена разработке нечеткой модели оценки состояний для анализа надежности компонентов распределенных МАС, ориентированной на поддержку принятия решений в области управления формированием, функционированием и развитием мультиагентного ЕВИП Арктических регионов. В качестве перспективного подхода к количественной оценке надежности МАС предложено использование аппарата нечеткой логики. Проведен анализ возможности адаптации существующих нечетких методов оценки надежности технологических процессов к задачам оценки надежности МАС и ЕВИП. Разработан вариант построения моделей оценки надежности функционирования МАС и ЕВИП на основе интегрального показателя надежности и развития метода марковских цепей.

### **Модель оценки состояния надежности функционирования агента**

В настоящее время активно развиваются технологии управления на основе методологий искусственного интеллекта с целью повышения потенциала самоорганизации и качества принимаемых решений [8]. Основопологающими составляющими направлений развития таких технологий являются агентные технологии. Эффективность управления современными мультиагентными информационными системами во все большей степени зависит от уровня интеллектуальности агентов, их способности к самоорганизованному поиску резервов и ресурсов развития виртуального пространства, способности видеть перспективы и последствия принимаемых решений.

Механизмы функционирования мультиагентных виртуальных сред должны обеспечивать процесс их эволюции таким образом, чтобы минимизировать риски возникновения проблемных ситуаций без разрушительных последствий. Это требует разработки специальной теории и методологии управления виртуальными организационными системами, основанными на обучении, адаптации и самоорганизации.

Далее рассмотрим один из возможных вариантов поведения агентно-ориентированной системы, основное целеустремление которой подчиняется минимизации риска последствий принимаемых решений и различных влияний внешних возмущений.

Процесс функционирования любой системы можно рассматривать как последовательную схему смены ее состояний на некотором интервале времени  $(t_0; t_k)$ . Состояние системы в каждый момент времени  $t$  из этого интервала характеризуется набором параметров этой системы, на которые накладываются ограничения  $\varphi(T, K, U) \leq 0$ , зависящие от множеств параметров  $\{T_i, K_j, U_{np}\}$  (технологических –  $\{T_i, i = \overline{1..I}\}$ ; конструктивных –  $\{K_j, j = \overline{1..J}\}$ ; управления –  $\{U_{np}, l = \overline{1..L}\}$ ). Выход за эти ограничения означает переход процесса во внештатную ситуацию. Эти ограничения «вырезают» на множестве всех состояний процесса  $n$ -мерную область (рис. 1), в которой процесс не выходит во внештатные ситуации – это область всех работоспособных состояний процесса  $S_p \subseteq S$ . На основе оценки свойств системы агент формирует с помощью когнитивных механизмов субъективное представление о системе. Это представление включает область возможных состояний, законы поведения системы, оценки риска.

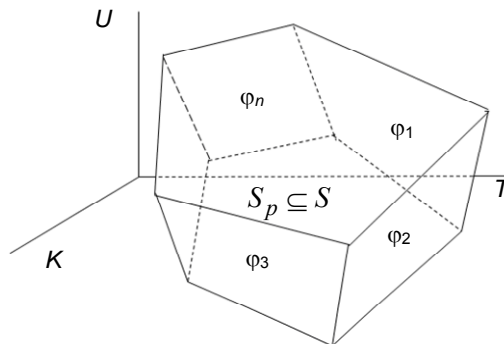


Рис. 1. Область существования состояний системы

В большинстве случаев управление складывается из целеустремлений к определенным состояниям, которые в конкретных ситуациях являются наиболее предпочтительными. Основой такого управления является представление о некоем центре – точке в пространстве состояний, которая доминирует по своим свойствам над остальной областью (рис. 2). Задача управления в этом случае понимается как задача перевода свойств системы в точку, как можно более близкую к области центра. Используемые на рис. 2 обозначения расшифрованы в табл. 1.

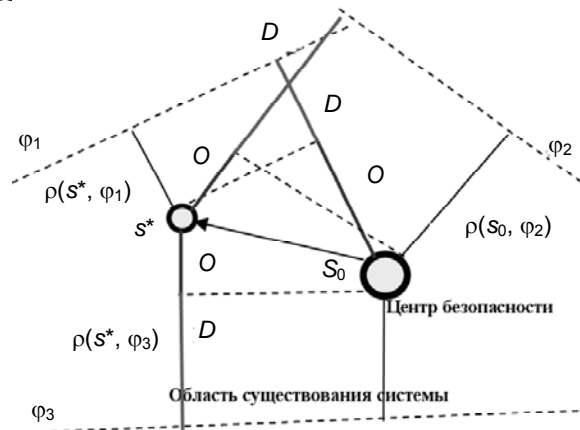


Рис. 2. Оценка индекса безопасности функционирования агента в пространстве состояний

Агент оценивает ситуацию, возникающую в системе, и ставит в соответствие каждой ситуации  $\tilde{S}_i$  из определенного набора ситуаций  $S_s$ , характеризующего все возможные состояния объекта, некоторое управляющее решение  $R_i$ . Перечень ситуаций, входящих в набор  $S_s$ , формируется агентом на основе своих знаний. Будем называть эти ситуации эталонами представлений агента. Входная ситуация  ${}^T S_0$  сравнивается с эталонными ситуациями  $\tilde{S}_i \in S_s$ , и определяется эталонная нечеткая ситуация, в некотором смысле наиболее близкая к входной нечеткой ситуации. Модель операции сравнения можно построить, используя операцию нечеткой эквивалентности [9].

Обозначения и формулы для определения индекса безопасности	Описание
$S$	множество всевозможных состояний системы
$S_p$	множество состояний агента
$\varphi_i, i = \overline{1..n}$	множество границ области состояния агента («вырезает» на $S$ множество $S_p$ )
$S_0$	точка процесса, соответствующая оценке центра безопасности
$s^*$	текущая точка
$l_i = \min(s^*, \varphi_i)$	расстояние от точки $s^*$ до границ области $\varphi_i$ состояния агента
$\Delta_i^* = \min \rho(s^*, s_0)_{\varphi_i}$	расстояние от точки $s^*$ до центра безопасности $S_0$ относительно границ
$\delta_i = \min \rho(s_0, \varphi_i)$	расстояние от центра безопасности $S_0$ до границ области возможных состояний $\varphi_i, i = \overline{1..n}$
$O_i = d_i - l_i$	степень удаленности данного состояния $s^*$ относительно границ $\varphi_i, i = \overline{1..n}$
$D_i = \delta_i - O_i$	степень удаленности для данного состояния $s^*$ относительно границ $\varphi_i, i = \overline{1..n}$

Таблица 1. Обозначения и формулы к рис. 2

*Формальное определение «нечеткой» ситуации.* Пусть  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество признаков, которые используются агентом. Каждый признак  $x_i$  описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle \beta_i, E_i, F_i \rangle$ , где  $\beta_i$  – название лингвистической переменной;  $E_i = \{E_i^1, E_i^2, \dots, E_i^{M_i}\}$  – термножество лингвистической переменной  $\beta_i$ ;  $F_i$  – базовое множество лингвистической переменной  $\beta_i$ .

*Нечеткое равенство или эквивалентность.* В качестве меры близости между ситуациями обычно рассматриваются два критерия: степень нечеткого включения и степень нечеткого равенства.

*Степень нечеткого включения* ситуации в ситуацию определяется выражением

$$v(\tilde{S}_{X_i}, \tilde{S}_{X_j}) = \&_X v(\mu_{S_{X_i}}(X), \mu_{S_{X_j}}(X)),$$

где

$$v(\mu_{S_{X_i}}(X), \mu_{S_{X_j}}(X)) = \&_{E_k} \left( \mu_{S_{X_i}}(X)(E_k) \rightarrow \mu_{S_{X_j}}(X)(E_k) \right);$$

$$\mu_{S_{X_i}}(X)(E_k) \rightarrow \mu_{S_{X_j}}(X)(E_k) = \max \left\{ 1 - \mu_{S_{X_i}}(X)(E_k), \mu_{S_{X_j}}(X)(E_k) \right\}.$$

Обычно считают, что ситуация  $\tilde{S}_i$  нечетко включается в ситуацию  $\tilde{S}_j$ ,  $\tilde{S}_i \subseteq \tilde{S}_j$ , если степень включения  $\tilde{S}_i$  в  $\tilde{S}_j$  не меньше некоторого порога включения  $t_{inc} \in [0, 6:1]$ , определяемого условиями управления, т.е.  $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t_{inc}$ .

*Степень нечеткого равенства.* Если множество текущих ситуаций  $\tilde{S}_X$  содержит такие ситуации  $\tilde{S}_{X_i}$  и  $\tilde{S}_{X_j}$ , что  $\tilde{S}_{X_i}$  нечетко включается в  $\tilde{S}_{X_j}$ , а  $\tilde{S}_{X_j}$  нечетко включается в  $\tilde{S}_{X_i}$ , то ситуации  $\tilde{S}_{X_i}$  и  $\tilde{S}_{X_j}$  нужно воспринимать как одну ситуацию. Это означает, что при данном пороге включения  $t_{inc}$  ситуации  $\tilde{S}_{X_i}$  и  $\tilde{S}_{X_j}$  примерно одинаковы. Такое сходство ситуаций называется нечетким равенством, при этом степень нечеткого равенства  $\mu(\tilde{S}_{X_i}, \tilde{S}_{X_j}) = v(\tilde{S}_{X_i}, \tilde{S}_{X_j}) \& v(\tilde{S}_{X_j}, \tilde{S}_{X_i})$ .

В отличие от набора  ${}^tS_s = \{ {}^tS_1, {}^tS_2, \dots, {}^tS_n \}$  текущих ситуаций, набор  $S_s = \{ \tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_n \}$ , ( $n \leq N$ ) эталонных ситуаций агента не содержит нечетко равных при заданном пороге равенства ситуаций. Предполагается, что множество  $S_s$  полно. Таким образом, ситуация  $\tilde{S}_i$  существует для любой входной ситуации  $S_0$ . По решающей таблице для этой эталонной ситуации определяется управляющее решение. Данный подход построен на основании метода ситуационного управления [10].

Для определения оценки уровня безопасности введем понятие индекса. Для оценки агентом текущего состояния системы необходимо сравнить на нечеткое равенство входную нечеткую ситуацию с нечеткой ситуацией, которая характеризует центр безопасности. При этом степень нечеткого равенства  $In(\tilde{S}_x^*) = v(\tilde{S}_x^*, \tilde{S}_{x_0}) \& v(\tilde{S}_{x_0}, \tilde{S}_x^*)$  покажет величину, которую можно определить как субъективный индекс идеала агента.

Тестовые результаты расчета центра безопасности агента представлены на рис. 3 и рис. 4, а–г.

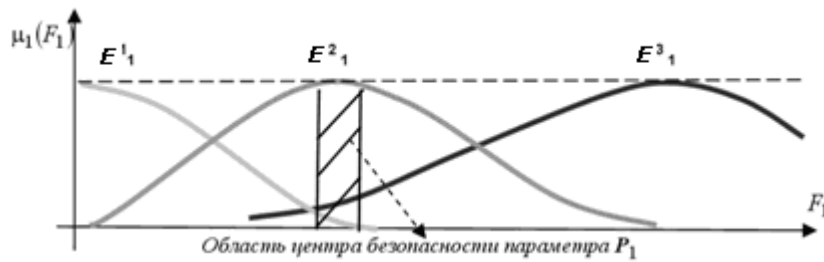


Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\langle \beta_i, E_i, F_i \rangle$

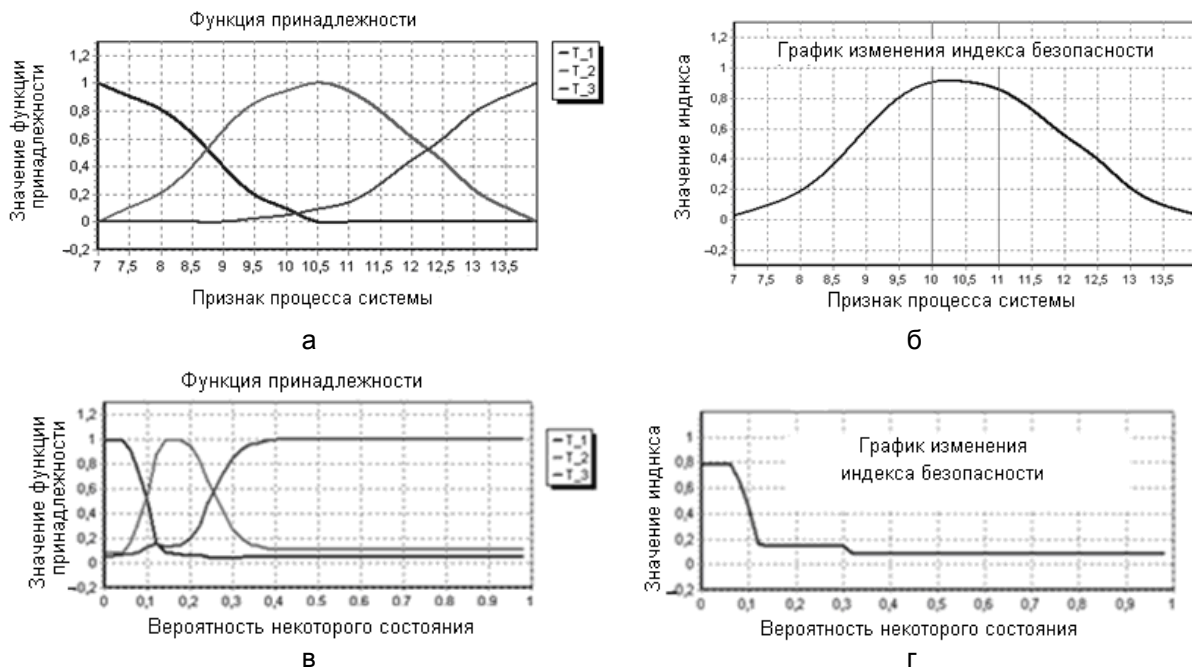


Рис. 4. Результаты расчета индекса безопасности: изменение функции принадлежности лингвистической переменной  $\langle \beta_i, E_i, F_i \rangle$  в зависимости от значений признака процесса системы (а); изменение индекса безопасности в зависимости от значений признака процесса системы (б); изменение функции принадлежности лингвистической переменной  $\langle \beta_i, E_i, F_i \rangle$  в зависимости от вероятности нахождения системы в некотором состоянии (в); изменение индекса безопасности в зависимости от вероятности нахождения системы в некотором состоянии (г)

Процесс принятия решений агентом может быть промоделирован на основе лингвистических переменных, с помощью которых формализуется качественная информация, представленная в словесной форме. По результатам контроля функционирования системы по имеющимся функциям принадлежности заполняется табл. 2. На основе этой таблицы проводятся вычисления индексов оценок уровня безопасности.

Исходная информация														
№ состояния	$p_1$			...	$p_n$			$d_1$			...	$d_m$		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	...	$T_1$	...	$T_k$	$T_1$	$T_2$	...	$T_1$	$T_2$	$T_3$	
1	$\mu_{11}(p_1)$	$\mu_{12}(p_1)$	$\mu_{13}(p_1)$	...	$\mu_{11}(p_n)$	...	$\mu_{1k}(p_n)$	$\mu_{11}(d_1)$	$\mu_{12}(d_1)$	...	$\mu_{11}(d_m)$	$\mu_{12}(d_m)$	$\mu_{13}(d_m)$	
2	$\mu_{21}(p_1)$	$\mu_{22}(p_1)$	$\mu_{23}(p_1)$	...	$\mu_{21}(p_n)$	...	$\mu_{2k}(p_n)$	$\mu_{21}(d_1)$	$\mu_{22}(d_1)$	...	$\mu_{21}(d_m)$	$\mu_{22}(d_m)$	$\mu_{23}(d_m)$	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		
$\nu$	$\mu_{\nu 1}(p_1)$	$\mu_{\nu 2}(p_1)$	$\mu_{\nu 3}(p_1)$	...	$\mu_{\nu 1}(p_n)$	...	$\mu_{\nu k}(p_n)$	$\mu_{\nu 1}(d_1)$	$\mu_{\nu 2}(d_1)$	...	$\mu_{\nu 1}(d_m)$	$\mu_{\nu 2}(d_m)$	$\mu_{\nu 3}(d_m)$	
$p_i$ – $i$ -й параметр системы; $d_j$ – $j$ -й возможный ущерб														
Расчет индекса														
1 этап														
	$p_1$			...	$p_n$			$d_1$			...	$d_m$		
1	$In_1(\tilde{S}_{p1})$			...	$In_1(\tilde{S}_{pn})$			$In_1(\tilde{S}_{d1})$			...	$In_1(\tilde{S}_{dm})$		
...	...			...	...			...			...	...		
$\nu$	$In_\nu(\tilde{S}_{p1}^*)$			...	$In_\nu(\tilde{S}_{pn}^*)$			$In_\nu(\tilde{S}_{d1})$			...	$In_\nu(\tilde{S}_{dm})$		
2 этап														
1	$In_1(\tilde{S}_{p(1-n)})$						$In_1(\tilde{S}_{d(1-m)})$							
...	...						...							
$\nu$	$In_\nu(\tilde{S}_{p(1-n)})$						$In_\nu(\tilde{S}_{d(1-m)})$							
3 этап														
1	$In_{Risk1}(\tilde{S})$													
...	...													
$\nu$	$In_{Risk\nu}(\tilde{S})$													

Таблица 2. Исходная информация для определения индексов безопасности и результаты вычислений

Если учитываются ущербы, которые возникают в процессе работы системы, то агент может определять и риск, который возникает при различных состояниях системы. Определение оценки индекса риска реализуются на основе того же механизма вычислений, что и оценки индекса безопасности. Риск в данном случае определяется как двойка <индекс безопасности, индекс ущерба>:

$$In_{Risk}(\tilde{S}^*) = \{In(\tilde{S}_p^*), In(\tilde{S}_d^*)\}.$$

### Методика расчета оценки состояний надежности МАС топологическим методом

В рамках разработки моделей надежности МАС и ЕВИП Арктической зоны РФ проведены исследования по адаптации методов оценки надежности технологических систем к задачам оценки надежности распределенных мультиагентных информационных систем.

Для формирования показателей безопасного функционирования различных систем в качестве параметров можно использовать следующие показатели надежности: показатели безотказности (вероятность безотказной работы; средняя наработка до отказа; средняя наработка на отказ; гамма-процентная наработка до отказа; интенсивность отказов; параметр потока отказов; средняя доля безотказной наработки; плотность распределения времени безотказной работы); показатели долговечности (средний ресурс; гамма-процентный ресурс; назначенный ресурс; средний срок службы; гамма-процентный срок службы; назначенный срок службы); показатели ремонтпригодности (вероятность восстановления работоспособного состояния; среднее время восстановления работоспособного состояния; интенсивность восстановления); показатели сохраняемости (средний срок сохраняемости; гамма-процентный срок сохраняемости).

Выше перечислены все показатели, входящие в стандарт по надежности. Исследователь выбирает те показатели, которые документируются в процессе работы системы. На этой основе информации определяются функции принадлежности для показателей надежности. В список показателей могут быть включены при необходимости и ущербы, которые проявляются в результате возникновения внештатных ситуаций. Формируется табл. 2, на основе которой рассчитывается интегрированный показатель надежности. Это может быть и риск-показатель, характеризующий безопасность работы системы.

Процесс функционирования системы – это непрерывная смена состояний. Смена состояний происходит под воздействием внешних и внутренних факторов. Могут возникать различные внештатные ситуации. Процесс смены состояний системы сопровождается также непрерывной сменой значений индексов безопасности или рисков, и происходит это непрерывно во времени. В работе делается предположение, что смену состояний системы можно описать марковскими случайными процессами. Марковские случайные процессы с конечным или счетным множеством возможных состояний обычно называют цепями Маркова. Например, для системы с четырьмя состояниями (рис. 5) может быть определена следующая система уравнений Колмогорова [11]:

$$\begin{aligned} \frac{dIn_1^{Risk}}{dt} &= -\lambda_{12}In_1^{Risk} + \lambda_{31}In_3^{Risk}; \\ \frac{dIn_2^{Risk}}{dt} &= -\lambda_{23}In_2^{Risk} - \lambda_{24}In_2^{Risk} + \lambda_{12}In_1^{Risk} + \lambda_{42}In_4^{Risk}; \\ \frac{dIn_3^{Risk}}{dt} &= -\lambda_{31}In_3^{Risk} - \lambda_{34}In_3^{Risk} + \lambda_{23}In_2^{Risk}; \\ \frac{dIn_4^{Risk}}{dt} &= -\lambda_{42}In_4^{Risk} - \lambda_{24}In_2^{Risk} + \lambda_{34}In_3^{Risk}. \end{aligned}$$

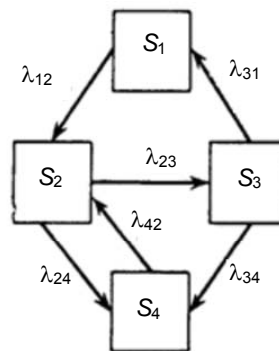


Рис. 5. Пример размеченного графа с четырьмя состояниями

Здесь  $\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Ind_{ij}^{Risk}(\Delta t)}{\Delta t}$  – плотность перехода  $\lambda_{ij}$  – предел отношения значения индекса за время  $\Delta t$  при переходе из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$  к длине промежутка  $\Delta t$ . Левая часть уравнений есть производная функции  $Ind^{Risk}(t)$ , которую можно называть интенсивностью перехода индекса оценки идеала агента.

Вывод аналогичных соотношений рассмотрен в [11]. Условия, при выполнении которых цепь Маркова обладает эргодическими свойствами и имеет единственное стационарное распределение, приведены в [12]. Используя структурное подобие вероятностного графа и нечеткого графа для моделирования процессов смены состояний мультиагентной информационной системы, рассматривается один из методов расчета марковских процессов – топологический метод [13]. Подобие графов позволяет использовать одни и те же формулы для расчета:

- вероятности нахождения системы в некотором состоянии (индексы оценки состояния надежности для нечеткой системы);
- коэффициентов готовности и простоя (индексы оценки состояния коэффициентов готовности и простоя);
- среднего времени наработки на отказ и среднего времени восстановления (индексы оценки состояний времени наработки на отказ и времени восстановления).

Если при этом учитывать свойства функций принадлежности, появляется возможность проводить диагностирование информационной системы.

Обозначим  $X$  – множество состояний системы:  $X = \{x_i, i \in I, i = \overline{1, n}\}$ , где  $x_i$  –  $i$ -е состояние;  $I$  – множество индексов всех возможных состояний системы;  $n$  – количество возможных состояний системы.

Разобьем множество  $X$  на два подмножества:

1. подмножество работоспособных состояний системы  $X_p$ :  $X_p = \{x_i, i \in I_p \subset I\}$ , где  $X_p$  – подмножество работоспособных состояний системы;  $I_p$  – множество индексов работоспособных состояний системы;

2. подмножество неработоспособных состояний системы  $\bar{X}_p : \bar{X}_p = \{x_i, i \in J \subset I\}$ , где  $\bar{X}_p$  – подмножество неработоспособных состояний системы;  $J$  – множество индексов неработоспособных состояний системы.

Нахождение системы в том или ином состоянии обуславливает случайный процесс  $X(t)$  перехода системы в пространстве ее состояний.  $X(t)$  называют также траекторией системы.

Представим  $X(t)$  в виде нечеткого графа состояний  $G(X, W)$ , где  $X$  – множество вершин графа, соответствующих множеству состояний  $X$ ;  $W$  – множество дуг, соединяющих вершины данного графа;  $P_1(t), \dots, P_i(t), \dots, P_6(t)$  – вероятности нахождения системы в  $i$ -м состоянии;  $d(w_{ij})$  – вес дуги  $w_{ij}$ ;  $\alpha_{ij}$  – нечеткая интенсивность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  (рис. 6).

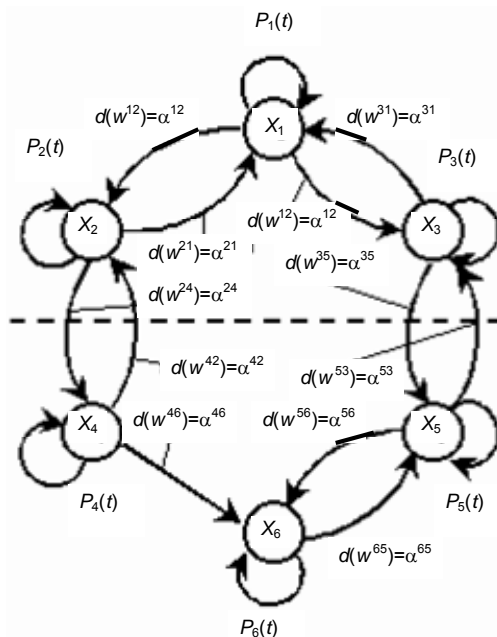


Рис. 6. Пример вероятностного графа состояний  $G(X, W)$

Вернемся к модели Маркова. Если заданы интенсивности  $\alpha_{ij}$ , то, составляя и решая систему уравнений Колмогорова, можно определить вероятности  $P_i(t)$  нахождения системы в  $i$ -м состоянии, а значит, и показатели надежности. Однако составление и решение системы уравнений Колмогорова является трудоемкой операцией, поэтому для решения подобных задач применяют топологический метод. Топологический метод использует аппарат теории графов применительно к решению задач надежности.

Рассмотрим методику решения задач методом, который позволяет непосредственно по графу состояний  $G(X, W)$  без составления и решения уравнений Колмогорова вычислять показатели надежности. Для этого введем некоторые определения.

*Прямой путь*  $I^j$  из вершины  $x_i$  в вершину  $x_j$  – цепь последовательно соединенных однонаправленных дуг, где каждая вершина имеет входящую и одну выходящую дуги, за исключением начальной и конечной, имеющих по одной дуге (рис. 7).

Вес  $k$ -го прямого пути из вершины  $i$  в вершину  $j$  рассчитывается как  $d(I_k^{ij}) = \prod_{w_{ij} \in W(I_k^{ij})} d(w_{ij})$ , где

$W(I_k^{ij})$  – множество дуг, которые составляют  $k$ -й прямой путь.

*Замкнутый контур*  $r$  – прямой путь, на котором начальная и конечная вершины совпадают (рис. 8, а). Вес замкнутого контура  $r$  равен  $d(r) = \prod_{w_{ij} \in W(r)} d(w_{ij})$ , где  $W(r)$  – множество дуг, входящих в

замкнутый контур  $r$ . Частным случаем замкнутого контура является петля (рис. 8, б), в которой входящая и выходящие дуги сливаются в одну. Вес петли при вершине определяется как отрицательная сумма весов дуг, исходящих из этой вершины:  $d(w_{ij}) = -\sum_{j \in J_n} d(w_{ij})$ , где  $J_n$  – множество индексов вершин, которые

связаны с  $i$ -й вершиной выходящими из нее дугами.

*Соединение графа*  $S$  – это частичный граф, который образуют только замкнутые контуры. Частичный граф представляет собой все вершины, некоторые дуги и петли исходного графа, которые составляют независимые замкнутые контуры (т.е. контуры, не имеющие общих вершин). Один граф может



располагать несколькими соединениями (рис. 9). При образовании соединений следует помнить, что каждая вершина графа  $G(X, W)$  имеет петлю.

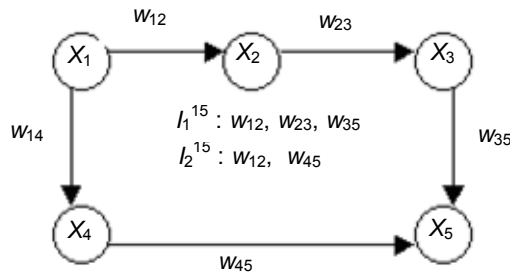


Рис. 7. Определение прямых путей на графе

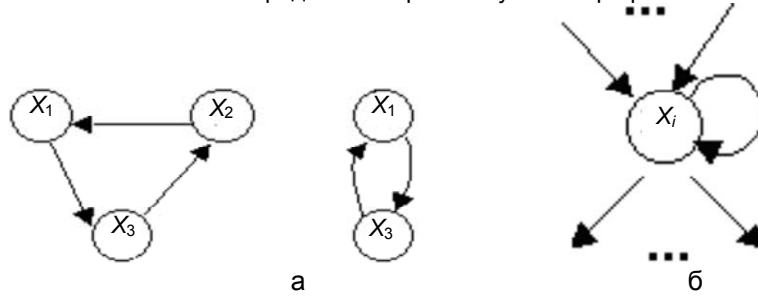


Рис. 8. Примеры замкнутых контуров: замкнутый контур (а); петля (б)

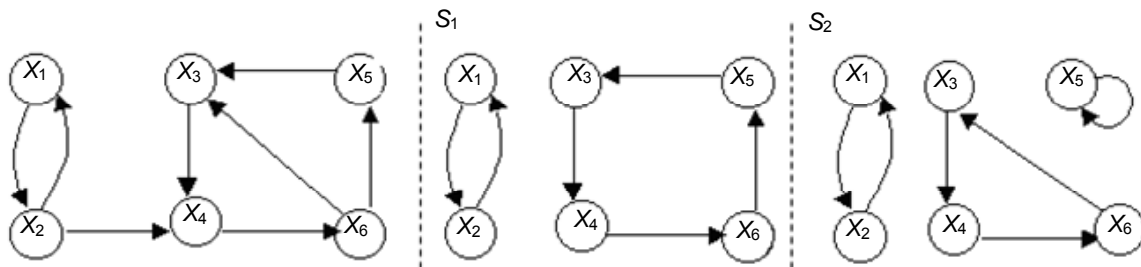


Рис. 9. Пример образования соединения графа

Вес  $j$ -го соединения равен  $d(S_j) = (-1)^v \cdot \prod_{r \in R(S_j)} d(r)$ , где  $v$  – число независимых замкнутых контуров, образующих соединение;  $R(S_j)$  – множество независимых замкнутых контуров, образующих соединение.

Определитель графа  $\Delta G = \sum_{S_j \in S} d(S_j)$ , где  $S$  – множество всех возможных соединений графа.

Теперь рассмотрим методику расчета показателей надежности вероятностного графа топологическим методом в установившемся режиме, где топологические коэффициенты  $C_i$  для каждой  $x_i$  вершины графа определяются непосредственно по графу, а затем вычисляется нужный показатель по ниже приведенным топологическим формулам.

Для определения коэффициента  $C_i$  необходимо:

1. Выбрать начальную вершину графа  $x_q$  отдельно для определения каждого из коэффициентов  $C_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ); начальная вершина может быть выбрана произвольно, однако выбор влияет на объем вычислений, поэтому ее надо выбирать так, чтобы могли быть выделены длинные прямые пути.
2. Построить множество  $K$  прямых путей из начальной вершины  $x_q$  в вершину  $x_i$ , для которой определяется коэффициент.
3. Для каждого  $k$ -го прямого пути построить множество замкнутых контуров подграфа  $G\{X_k\}$  и образовать возможные комбинации независимых замкнутых контуров (множество соединений  $S$ ), где  $G\{X_k\}$  – подграф графа  $G(X, W)$ , образованный удалением множества вершин, входящих в  $k$ -й путь и прилегающих к нему дуг.
4. Записать коэффициенты  $C_i$  по найденным составляющим по формуле  $C_i = \sum_{k \in K} d(I_k^{q_i}) \cdot \Delta G\{X_k\}$ , где  $K$  – множество прямых путей из произвольно выбранной вершины  $x_q$  в  $x_i$ ;  $X_k$  – множество вершин, входящих в  $k$ -й прямой путь.

Используя топологические коэффициенты, можно записать основные показатели надежности системы в установившемся режиме:

– вероятность нахождения системы в  $i$ -м состоянии (индекс оценки состояния надежности вершины  $x_i$ ):  $Ind_{p_i} = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^n C_j}$ , где  $n$  – число вершин графа;

– индекс оценки состояния коэффициента готовности системы  $Ind_{K_g} = \frac{\sum_{i \in I_p} C_i}{\sum_{j \in I} C_j}$ , где  $I_p$  – множество индексов работоспособных состояний системы;

– индекс оценки состояния коэффициента простоя системы  $Ind_{K_p} = \frac{\sum_{i \in J} C_i}{\sum_{j \in I} C_j}$ , где  $J$  – множество индексов неработоспособных состояний системы;

– индекс оценки состояния средней наработки на отказ  $Ind_{T_o} = \frac{\sum_{i \in I_p} C_i}{\sum_{i \in I_p^+} C_i \left( \sum_{j \in J} \alpha_{ij} \right)} = \frac{\sum_{i \in I_p} C_i}{\sum_{i \in J^+} C_i \left( \sum_{j \in I_p} \alpha_{ij} \right)}$ , где  $I_p^+$

– подмножество индексов граничных состояний из  $X_p$ , из которых в неработоспособное состояние можно попасть за один переход;

– индекс оценки состояния среднего времени восстановления  $Ind_{T_v} = \frac{\sum_{i \in J} C_i}{\sum_{i \in I_p^+} C_i \left( \sum_{j \in J} \alpha_{ij} \right)} = \frac{\sum_{i \in J} C_i}{\sum_{i \in J^+} C_i \left( \sum_{j \in I_p} \alpha_{ij} \right)}$ ,

где  $J^+$  – подмножество индексов граничных состояний из  $\bar{X}_p$ , из которых в работоспособное состояние можно попасть за один переход.

Основные положения топологического метода могут быть применены для определения показателей надежности системы в неустановившемся режиме с использованием преобразований Лапласа. Необходимо отметить, что показатели надежности, вычисленные по нечеткой модели, должны совпадать с показателями надежности, вычисленными по вероятностной модели. В отличие от вероятностной марковской модели, где суммы вероятностей состояний для каждого момента времени равны единице, в нечеткой системе такое условие на индекс надежности не накладывается. В связи с этим по равенству показателей можно проводить верификацию нечеткой модели.

Алгоритм оценки состояний объекта и расчета показателей надежности по нечеткой модели включает следующие основные этапы:

1. ввод информации о реальной ситуации на объекте;
2. оценка индексов надежности состояний [14];
3. оценка нечетких интенсивностей переходов из состояния в состояние;
4. расчет показателей надежности системы.

Рассмотренные в настоящей работе модель, методика и алгоритм определения показателей надежности сложных информационных систем на основе использования нечеткой марковской модели реализованы в виде технологии оценки состояний надежности многоагентных распределенных информационных систем, ориентированных на решения задач управления региональным развитием и использование для формирования ЕВИП Арктических регионов.

### **Пример практической реализации**

Пусть имеется распределенная информационная система, которая состоит из двух серверов. В случае аппаратной или программной реализации агентов данные серверы могут быть представленными отдельными агентами. При работоспособности одного из серверов (агентов) система работоспособна, так как каждый сервер (агент) может выполнять все функции.

Обозначим  $\lambda_1, \lambda_2$  – интенсивность отказа первого и второго сервера;  $\mu_1, \mu_2$  – интенсивность восстановления первого и второго сервера.

Для обслуживания серверов существует одна бригада, ремонтирующая одновременно только один сервер, который отказал первым.

Необходимо определить топологическим методом показатели надежности.

Работоспособные состояния:  $x_1$  – оба сервера в работоспособном состоянии;  $x_2$  – отказ первого сервера и его восстановление, второй в работоспособном состоянии;  $x_3$  – отказ второго сервера и его восстановление, первый в работоспособном состоянии.

Неработоспособные состояния:  $x_4$  – при восстанавливающемся первом сервере, отказал и второй;  $x_5$  – при восстанавливающемся втором сервере, отказал первый сервер (рис. 10).

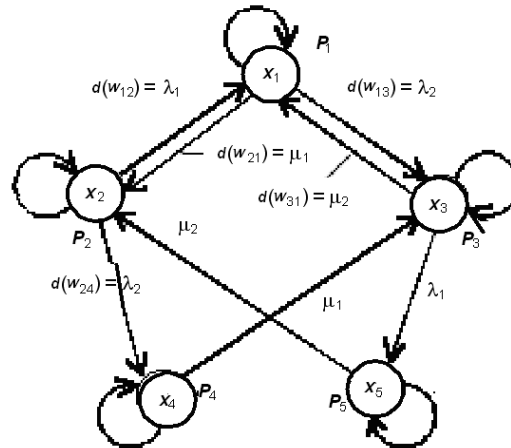


Рис. 10. Граф состояний

Вычисляем топологические коэффициенты. Для нахождения коэффициента  $C_1$  в качестве начальной выбираем вершину  $x_5$ .

$$C_1 = \alpha_{52}\alpha_{24}\alpha_{43}\alpha_{31} + \alpha_{52}\alpha_{21}(-1)^{v=2}d(w_{33})d(w_{44}) = \alpha_{52}\alpha_{21}[-(\alpha_{35} + \alpha_{31})] \times (-\alpha_{43}) + \alpha_{52}\alpha_{24}\alpha_{43}\alpha_{31} = \mu_2\mu_1^2(\lambda_1 + \mu_2) + \mu_2^2\lambda_2\mu_1 = \mu_2\mu_1(\mu_1\lambda_1 + \mu_1\mu_2 + \mu_2\lambda_2).$$

Для нахождения коэффициента  $C_2$  в качестве начальной выбираем вершину  $x_4$ .

$$C_2 = \alpha_{43}\alpha_{35}\alpha_{52}(-1)^{v=1}d(w_{11}) + \alpha_{43}\alpha_{31}\alpha_{12}(-1)^{v=1}d(w_{55}) = \mu_1\lambda_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2) + \mu_1\mu_2^2\lambda_1 = \mu_1\mu_2(\lambda_1^2 + \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\mu_2),$$

$$C_3 = \mu_1\mu_2(\lambda_2^2 + \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\mu_1),$$

$$C_4 = \lambda_1\lambda_2\mu_2(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2),$$

$$C_5 = \lambda_1\lambda_2\mu_1(\lambda_2 + \mu_1 + \lambda_1).$$

Теперь можно определить искомые оценки состояний показателей надежности:

$$Ind_{P_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5}, \quad Ind_{K_s} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5}, \quad Ind_{K_p} = \frac{C_4 + C_5}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5},$$

$$Ind_{T_o} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2\lambda_2 + C_3\lambda_1}, \quad Ind_{T_v} = \frac{C_4 + C_5}{C_4\mu_1 + C_5\mu_2}.$$

Определяя интенсивности  $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ , можно получить количественные оценки состояний показателей надежности системы.

### Заключение

В ходе исследований разработана технология оценки состояний надежности многоагентных распределенных информационных систем, основанная на использовании нечеткой марковской модели, узлами которой являются интегральные показатели надежности. Узлы графа образуют интегрированные оценки состояния показателей надежности, которые определяются степенью нечеткого равенства некоторого текущего состояния и исправного состояния, принадлежащего области безопасного функционирования системы. Узлы графа могут быть образованы и на основе риск-показателей. В этом состоит основное отличие общепринятой цепи Маркова от рассматриваемой в работе. Технология позволяет определить распределение информационных и аппаратных ресурсов в сложных информационных системах, обеспечивающее требуемый уровень надежности.

Предложенный подход к оценке надежности распределенных МАС и ЕВИП на основе нечеткой марковской модели имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием вероятностной модели Маркова. Основное преимущество нечетких марковских моделей состоит в том, что на основе экспертных оценок можно учесть наличие помех в радиосвязи в период геомагнитных возмущений, влияние интенсивности космических лучей, психофизиологическое состояние оператора, которое во многом зависит как от вариации геомагнитного поля, так и от интенсивности космических лучей. В данном случае для оценки состояний необходим меньший объем статистического материала, так как за основу берутся экспертные знания. Подход обеспечивает более гибкую адаптацию к конкретной задаче и позволяет выпол-

нять диагностирование объекта уже на этапе расчета интегрального показателя надежности. Гибкость достигается за счет того, что состояние надежности может оцениваться сразу по нескольким надежностным показателям. Диагностика на этапе вычисления интегрального показателя состояний достигается за счет того, что вычисления можно разделить на разные этапы. Каждый этап оценивает какой-либо из отдельных показателей, что в конечном итоге позволяет сделать вывод о состоянии соответствующего элемента.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности исследования нечетких марковских моделей для целей обеспечения надежности распределенных МАС и ЕВИП.

Полученные результаты исследований в области создания и развития моделей и методов оценки надежности распределенных мультиагентных информационных систем, могут найти применение при формировании ЕВИП Арктических регионов РФ в рамках реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» на территории Мурманской области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №12-07-00138-а «Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России»).

### Литература

1. Олейник А.Г., Федоров А.М. Проблемы и задачи формирования единого информационного пространства Арктической зоны Российской Федерации // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. – Вып. 2. – С. 19–28.
2. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Архитектура и технологии формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 6 (76). – С. 98–104.
3. Затуливетер Ю.С. Компьютерный базис сетевидного управления // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: Труды конф. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 492–511.
4. Путилов В.А., Шишаев М.Г., Олейник А.Г. Технологии распределенных систем информационной поддержки инновационного развития региона // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – 2008. – Т. 39. – С. 40–63.
5. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: URSS, 2002. – 352 с.
6. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С. Модели, методы и программные средства поддержки взаимодействия интеллектуальных агентов // Информационные технологии и вычислительные системы. – М.: URSS, 2008. – Вып. 3. – С. 22–29.
7. Маслобоев А.В. Подходы к обеспечению информационной безопасности в открытых распределенных мультиагентных виртуальных бизнес-средах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 98–104.
8. Виноградов Г.П. Индивидуальное принятие решений: поведение целеустремленного агента. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2011. – 164 с.
9. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
10. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
11. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 551 с.
12. Дудин А.Н., Медведев Г.А., Меленец Ю.В. Практикум на ЭВМ по теории массового обслуживания: Учебное пособие. – Минск: Изд-во БГУ, 2000. – 109 с.
13. Палюх Б.В., Мироненко А.С. Надежность и эффективность экономических информационных систем. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2003. – 157 с.
14. Богатиков В.Н. и др. Приложения метода разделения состояний к управлению технологической безопасностью на основе индекса безопасности. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2009. – 398 с.

**Маслобоев Андрей Владимирович** – ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

**Богатиков Валерий Николаевич** – ФГБУН Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, доктор технических наук, профессор, vnbgtk@iimm.kolasc.net.ru