

УДК 004.9

А.А. Скатков, Д.Ю. Воронин

Севастопольский национальный технический университет, Севастополь

## УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ПРИ КРИТИЧЕСКОМ ИНФРАСТРУКТУРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В работе предложены информационные технологии, ориентированные на поддержку принятия решений по управлению ресурсами при критическом инфраструктурном взаимодействии в условиях неопределенности. Разработанное инструментальное средство позволяет в реальном масштабе времени обеспечить гарантированную работоспособность критической инфраструктуры. В статье приводятся результаты моделирования.

**Ключевые слова:** дефицит априорной информации, имитационное моделирование, поддержка принятия решений, распределение ресурсов, оценка критических событий, критические инфраструктуры.

### Введение

Функционирование энергетических, транспортных, производственных и экологических систем является критическим в том смысле, что незначительные сбои при их взаимодействии могут привести к авариям, в большинстве случаев носящим характер катастроф. Процессы принятия управленческих решений при критическом инфраструктурном взаимодействии сопряжены с необходимостью в режиме реального времени обеспечивать сбалансированное распределение доступных ресурсов в интересах различных систем, имеющих противоречивые целевые функции.

Особую сложность при управлении современными инфраструктурами человеческой деятельности (атомными станциями, системами противоракетной обороны, мощными распределенными энергетическими и аэрокосмическими системами) формирует их неотъемлемое свойство – критичность, то есть способность при возникновении незначительных сбоев переходить в поглощающее состояние, сопровождающиеся авариями в большинстве случаев носящими характер катастроф. Дополнительную сложность при принятии решений в данной предметной области формируют как директивные требования к оперативному управлению, так и существенный дефицит априорной информации о взаимосвязи характеристик огромного числа используемых компонентов: подсистем, встраиваемых модулей, как автоматических, так и автоматизированных – основанных на процессах поддержки принятия решений посредством диалоговых взаимодействий с ЛПР. Кроме того, потребность в вычислительных ресурсах нестационарна и зависит от складывающейся информационной ситуации. Таким образом, задача обеспечения эффективного управления ресурсами при критическом инфраструктурном взаимодействии в условиях неопределенности актуальна.

Статья построена следующим образом: первый раздел содержит описание постановки задачи, приводится ее формализация; во втором разделе описа-

ны результаты системного анализа задачи; Программно-диалоговый комплекс описан в третьем разделе; результаты моделирования показаны в четвертом разделе; в заключении представлены основные выводы по проведенным исследованиям.

### 1. Постановка задачи

Формально распределенную критическую инфраструктуру (РКИ) можно описать в качестве динамической системы (рис. 1), функционирующей на основе управлений  $u_i \in U$ , компенсирующих возмущающее воздействие  $\vartheta$  и обеспечивающих требуемую фазовую траекторию  $\Xi$ , связанную с пребыванием РКИ в работоспособных состояниях  $S: S_1(t), S_2(t+1), \dots, S_n(t+n)$ , при безусловном выполнении целевого ограничения  $P_{\Pi}(t) \equiv 0, \forall i = \{1, 2, \dots, |\bar{S}|\}$ , где  $P_{\Pi}(t)$  – вероятность перехода из состояния  $S_i$  в  $S_{\Pi}$ ;  $S_i \in S, S \cap S_{\Pi} = \emptyset$ ;  $S_{\Pi}$  – поглощающее состояние РКИ. Множество параметров  $TrD$  описывает директивные требования, базовым из них является определенный регламентом срок  $t_{дир}$ , до которого следует выработать  $u_i$ . Нарушение директивных требований может привести к переходу РКИ в поглощающее состояние, сопровождающееся человеческими жертвами, техногенными катастрофами и существенным материальным ущербом.

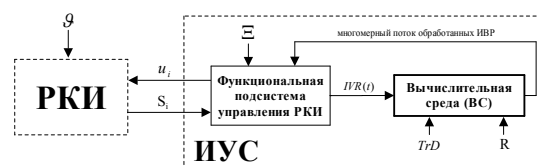


Рис. 1. Функционально-структурная схема информационного взаимодействия РКИ и ИУС

Целью функционирования информационно-управляющей системы (ИУС) является синтез управлений  $u_i$ . Необходимо отметить, что для выработки  $u_i$  необходимо обработать множество всех

информационно-вычислительных работ (ИВР) в директивный срок. Каждая из этих работ имеет сложную структуру, которую в общем случае можно задать графом  $G_b(t)$ , множество дуг которого  $\Gamma_b(t) = \bigcup_a g_{b,a}(t)$ , где  $g_{b,a}(t)$  – дуга графа  $G_b(t)$ , соответствующая а-му заданию б-й работы  $IVR(t)$ . Таким образом, элементы множества  $IVR(t)$  отображаются в элементы множества  $G(t) = \bigcup_b G_b(t)$ . Подробнее структурно-иерархические уровни ИВР изображены на рис. 2.

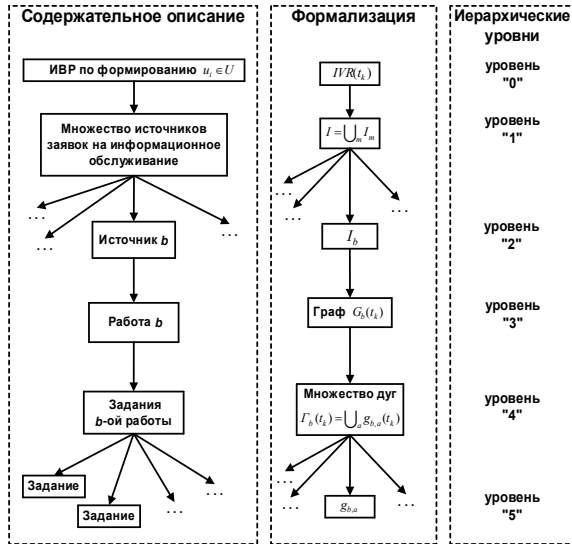


Рис. 2. Структурно-иерархические уровни ИВР

$G(t_k) = \bigcup_b G_b(t_k)$  – множество графов всех незавершенных ИВР; где  $G_b(t_k)$  – граф б-й ИВР;  $\Gamma_b(t_k) = \bigcup_a g_{b,a}(t_k)$  – множество дуг б-й ИВР (задания);  $g_{b,a}(t_k)$  – дуга, соответствующая а-му заданию б-й ИВР.

Для обеспечения терминальной готовности РКИ (свойство ИУС до срока  $t_{дир}$  выработать  $u_i$ ) следует в моменты  $T_{pp} = \bigcup_1 t_i$ ,  $t_i \in [0; T]$  эффективно перераспределять ресурсы ИУС, т. е.  $t_{\phi}^k(s) = t_k + \max_{j \in J} (ov_j(s, t_k))$ , где  $t_{\phi}^k(s)$  – момент окончания выполнения множества работ по формированию  $u_i$  при s-м варианте распределения ресурсов, установленном в момент времени  $t_k \in T_{pp}$ ;  $ov(s, t_k)$  – вектор остаточных длительностей выполнения работ по формированию  $u_i$  при выборе s-го варианта распределения ресурсов в момент  $t_k$ ;  $J = \{1, 2, \dots, |IVR|\}$ . Ограничения на максимальный объем вычислительных ресурсов, доступных в моменты  $T_{pp}$ , задаются матрицей  $R$ . Ее столбцы соответствуют типам ресурсов, а строки – ресурсным ограничениям для  $\forall t_i \in T_{pp}$ .

Формально задачу управления вычислительными ресурсами распределенных критических инфраструктур можно сформулировать следующим образом. Пусть дан критериальный функционал  $K(t_k, m(t_k), X_z^{K,U}, q_k) \rightarrow \text{extr}_{q_k \in VR(t_k)}$ . Необходимо для

всех  $t_k \in [0; T_{pp}]$  найти такие  $q_k \in VR(t_k)$ , которые обеспечивают экстремум  $K$  при выполнении динамически изменяющихся ресурсных ограничений  $\forall z: 1, 2, \dots, N: \left( \sum_K \sum_U X_z^{K,U}(t_k) \leq r_{k,z} \right)$ , условий кор-

ректности  $\bar{G}(t_k) \in G_0$ ,  $D(t_k) \in D_0$  и  $q_k = q_k(t_k, \bar{G}(t_k), D(t_k), R, m(t_k))$ , где  $t_k$  – k-й момент времени принятия решений о распределении ресурсов;  $q_k \in VR(t_k)$  –  $q_k$ -й вариант распределения ресурсов;  $VR(t_k)$  – множество допустимых вариантов распределения ресурсов;  $t_{\phi}^k(q_k)$  – моменты окончания выполнения ИВР, оцениваемые в k-й момент времени при  $q_k$ -м варианте распределения ресурсов;  $\bar{G}(t_k)$  – граф незавершенных работ в интервале  $[t_k; t_{пог}]$ ;  $D(t_k)$  – граф структуры вычислительной среды, доступной в  $t_k$ ;  $m(t_k)$  – используемая модель терминального распределения вычислительных ресурсов.

## 2. Системный анализ задачи

С первого взгляда может показаться, что данную проблему можно решить привлечением дополнительных вычислительных мощностей. Но это заблуждение, так как вычислительные ресурсы также сложны по своей структуре и могут претерпевать отказы. Никакая аппаратная избыточность: дублирование, троирование и т.п. эту проблему полностью не решают, в том числе и в силу массогабаритных и стоимостных ограничений. Кроме того, необходимо учесть, что подавляющее большинство систем критического применения являются автоматизированными, так как в большинстве случаев только человек способен скомпенсировать внештатность ситуации: принять обоснованные решения, переводящие систему в требуемую динамику. Для результативной работы ЛПР (помимо его квалификации и опыта) необходимо иметь достаточный резерв времени.

Таким образом, к ресурсному обеспечению информационно-управляющих систем предъявляются повышенные требования, что обусловлено особыми функциональными свойствами РКИ: управление обеспечивает траекторию в работоспособных состояниях, наличие поглощающего состояния, критичность, режим реального времени, нестационарность, недостаток априорной информации, терми-

нальная готовность. Возникает конфликт между дефицитом вычислительных ресурсов информационно-управляющих систем и весьма сжатыми директивными сроками выполнения заданного комплекса информационно-вычислительных работ.

В теории массового обслуживания при построении моделей технических систем широко используется понятие – коэффициент готовности. То есть, готовность системы принять заявку на обслуживание. Но для рассматриваемой проблемы важно не только начать выполнение информационно-вычислительной работы, но и закончить ее выполнение в установленный директивный срок. То есть, под терминальной готовностью понимают свойство информационно-управляющей системы выработать в установленный регламентом срок необходимое управляющее воздействие, препятствующее влиянию внешних возмущений, предотвращающее переход объекта критического применения в поглощающее состояние и обеспечивающее требуемую траекторию ее динамики в работоспособных состояниях. Ситуация существенно усложняется дефицитом априорной информации и ограниченным резервом времени, отводимым для принятия и реализации диспетчерских управлений. Диаграмма динамики РКИ и временная эпюра такта управления приведены на рис. 3, где  $t_n$  – возникновение запроса на выполнение ИВР;  $t_p$  – начало выполнения ИВР;  $t_{\phi(I)}$  – окончание выполнения всех ИВР при доминирующем варианте распределения ресурсов;  $t_{\phi(II)}$  – окончание выполнения ИВР при допустимом варианте распределения ресурсов;  $t_{дир}$  – директивное время окончания выполнения всех ИВР;  $t_{\phi(III)}$  – окончание выполнения ИВР при нарушении директивного срока;  $t_{пог}$  – момент времени, после которого  $P_{i\Pi}(t_k) \neq 0$ ;  $\Delta t_{\phi(I)}$  – резерв времени, характеризующий терминальную готовность при доминирующем варианте распределения ресурсов;  $\Delta t_{\phi(II)}$  – резерв времени, характеризующий терминальную готовность при допустимом варианте распределения ресурсов;  $\Delta t_{дир}$  – резерв времени для обеспечения терминальной готовности;  $\Delta t_{\phi(III)}$  – дополнительный резерв времени для предотвращения  $P_{i\Pi}(t_k) \neq 0$ ;  $\Delta t_{пог}$  – резерв времени для обеспечения критической готовности. Очевидно, что качественные понятия терминальная и критическая готовность необходимо уточнить количественными оценками. Для этой цели введены коэффициенты терминальной и критической готовности, которые соответствуют потенциальной способности окончить выполнение множества всех информационно-вычислительных работ в директивный срок. Эти коэффициенты ( $K_{Т.Г.}$  и  $K_{К.Г.}$ ) могут быть использованы для оценки различных вариантов распределения вычислительных ресурсов с точки зрения обеспечения высокой терминальной готовности РКИ.

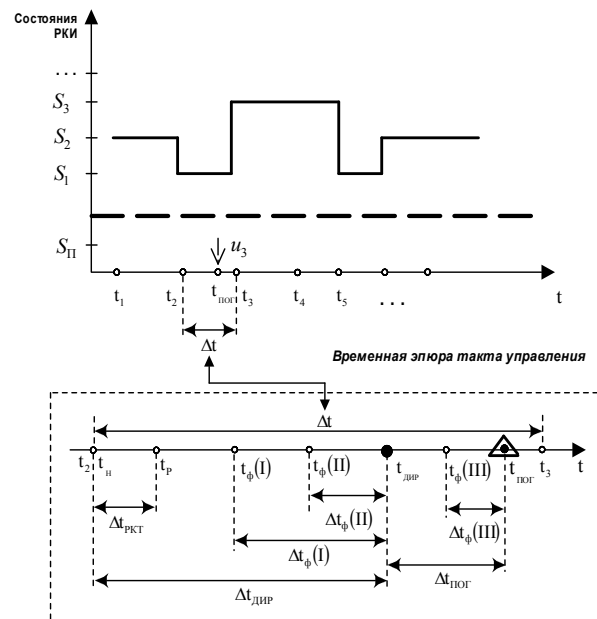


Рис. 3. Временная диаграмма динамики РКИ и ее особые точки

Они являются основной системной характеристикой ИУС. Область их изменения – от нуля до единицы, для наилучшего случая – единица. Если

$$\left[ (t_{дир} - t_{\phi}^k(s)) = \max_{h \in VR(t_k)} (t_{дир} - t_{\phi}^k(h)) \right],$$

то полагаем, что  $K_{Т.Г.}(t_{\phi}^k(s)) = 1$ , иначе

$$K_{Т.Г.}(t_{\phi}^k(s)) = \frac{t_{дир} - t_{\phi}^k(s)}{\max_{h \in VR(t_k)} (t_{дир} - t_{\phi}^k(h))},$$

где  $VR(t_k)$  – множество допустимых вариантов распределения ресурсов в момент времени  $t_k \in T_{pp}$ .

Аналогично, если

$$\left[ (t_{пог} - t_{\phi}^k(s)) = \max_{h \in VR(t_k)} (t_{пог} - t_{\phi}^k(h)) \right],$$

то  $K_{К.Г.}(t_{\phi}^k(s)) = 1$ , иначе

$$K_{К.Г.}(t_{\phi}^k(s)) = \frac{t_{пог} - t_{\phi}^k(s)}{\max_{h \in VR(t_k)} (t_{пог} - t_{\phi}^k(h))},$$

где  $t_{пог}$  – момент времени, после которого РКИ может перейти в  $S_{II}$  из-за несвоевременного выполнения множества работ по формированию  $u_i \in U$ . Таким образом,  $K_{Т.Г.}$  определен для случая  $t_{\phi}^k(s) \leq t_{дир}$ , а  $K_{К.Г.}$  – для  $t_{дир} < t_{\phi}^k(s) < t_{пог}$ .

Максимум коэффициента терминальной готовности может быть достигнут реализацией оптимального варианта распределения ресурсов – возникает сложная многоэтапная задача терминального распре-

деления вычислительных ресурсов. Задача существенно усложняется тем, что требуется ее решать в реальном времени. Более того, на ИУС постоянно действуют возмущения (как на граф информационно-вычислительных работ, так и на граф вычислительной среды). В каждой точке возникновения этих возмущений необходимо решать задачу распределения ресурсов заново. Таким образом, задача терминального распределения ресурсов может быть представлена как задача отображения графа информационно-вычислительных работ на граф вычислительной среды при учете ресурсных ограничений, заданных матрицей R.

*Утверждение:* «критериальный функционал оценки  $q_k$ -го варианта распределения ресурсов равен:

$$K = \begin{cases} K_{T.G.} (t_{\phi}^k(q_k)) & \text{при } t_{\phi}^k(q_k) \leq t_{\text{ДИР}}; \\ K_{K.G.} (t_{\phi}^k(q_k)) & \text{при } t_{\text{ДИР}} < t_{\phi}^k(q_k) < t_{\text{ПОГ}} \end{cases}$$

при ограничении  $q_k \in VR(t_k)$  справедливо, если при отображении  $\bar{G}(t_k)$  на  $D(t_k)$  выполняются следующие условия:

$$\forall z 1, 2, \dots, N: \left( \sum_K \sum_U X_z^{K,U}(t_k) \leq r_{k,z} \right), \\ \forall t_k \in [0; T_{pp}]: t_{\phi}^k(vr(t_k)) < t_{\text{ПОГ}}, \\ \forall t_k \in [0; T_{pp}]: \left| \overline{IVR}(t_k) \right| > \left| \overline{IVR}(t_{k+1}) \right|,$$

где  $r_{k,z}$  – элемент R, задающий объем ресурсов z-го типа в  $t_k$ ;  $X_z^{K,U}(t_k)$  – объем ресурсов z-го типа, выделяемых в  $t_k$  для обработки U-го задания K-й работы, N – число столбцов матрицы R.

С учетом вышеизложенного, формализация проблемы управления вычислительными ресурсами распределенных критических инфраструктур имеет следующий вид: необходимо для всех  $t_k \in [0; T_{pp}]$  найти такие  $vr(t_k) \in VR(t_k)$ , что

$$K(vr(t_k)) = \begin{cases} \max_{q_k \in VR(t_k)} \left\{ K_{T.G.} [t_{\phi}^k(q_k)] \right\}, \\ \text{при } t_{\phi}^k(vr(t_k)) \leq t_{\text{ДИР}}; \\ \max_{q_k \in VR(t_k)} \left\{ K_{K.G.} [t_{\phi}^k(q_k)] \right\}, \\ \text{при } t_{\text{ДИР}} < t_{\phi}^k(vr(t_k)) < t_{\text{ПОГ}}. \end{cases}$$

В соответствии с тем, что задача терминального распределения ресурсов является NP-сложной задачей нелинейного программирования, то для ее аналитического точного решения разработаны методы, основанные на переборе вариантов. Следовательно, область применения аналитических моделей – регулярные структуры графов информационно-вычислительных работ и вычислительные среды относительно малой размерности. Принимая во внимание все вышесказанное, вопрос об алгоритмической разрешимости задачи терминального распределения ресурсов становится актуальным.

Попытки решения этой задачи ведут к разработке специализированных информационных технологий [1, 2], которые способны парировать дефицит априорной информации на основе адаптивного подхода к поиску функциональных моделей диспетчеризации при асимптотической минимизации многоверсионной оценки потерь и кластеризации факторного пространства информационных ситуаций в реальном масштабе времени.

Для интеграции предлагаемых информационных технологий была построена информационно-логическая модель поиска эффективных решений по терминальному распределению ресурсов, которая основана на основной триаде системного подхода: цель, функции, структура. Соответственно цель определяется совокупностью целевых назначений, каждой подфункции соответствует информационная технология, и в результате мы получаем структурную единицу.

Появляется возможность организовать поисковую процедуру  $vr(t_k) = \Psi \{ \text{АМТР} \vee \Omega \{ Z \}, t_k \in T_{pp} \}$ ,  $Z = (\bar{G}(t_k), D(t_k), R, i, P_0 \{ c, \text{InfS}(t_k), \chi \}, \zeta)$ , где  $\Psi$  – оператор выбора ЛПП варианта терминального распределения вычислительных ресурсов ИУС;  $\Omega$  – оператор формирования эффективных вариантов распределения ресурсов, полученных на основе функциональной модели, выбранной адаптивно из РР-комплекса;  $i$  – индекс выбранной функциональной модели по терминальному распределению вычислительных ресурсов;  $P_0$  – оператор формирования вектора начального предпочтения; КР-комплекс – многоверсионный блок модулей принятия компромиссных решений между точностью и реактивностью при коррекции вектора начальных предпочтений;  $c$  – индекс, соответствующий версии модуля, выбранного ЛПП из КР-комплекса;  $\text{InfS}(t_k)$  – результат идентификации, который задает класс информационной ситуации, складывающейся в момент времени  $t_k$ ;  $\chi, \zeta$  – управляющие параметры адаптивного выбора.

### 3. Описание реализованного инструментального средства

Целевым назначением программно-диалогового комплекса поддержки принятия решений (ПДК ППР) является обеспечение высокой терминальной готовности РКИ при принятии диспетчерских решений в реальном масштабе времени. Структура обеспечивает поддержку следующих базовых функций: сбор и обработка априорной информации о структуре графов  $\bar{G}(t_k)$ ,  $D(t)$  и элементах матрицы R; идентификация информационной ситуации при использовании модели IS; адаптивный выбор модели из РР-комплекса; коррекция вектора начальных предпочтений на основе многоверсионного КР-

комплекса; інтерфейс взаємодіяння с ЛПР для реалізації типових сценаріїв с целью получения підмножества ефективних рішень.

В ПДК ППР передбачено декілька сценаріїв взаємодіяння, які вибираються в відповідності с рідшувими функціональними задачами. Крім того, передбачена можливість адаптувати процес підтримки прийняття рішень с учетом рівня кваліфікації ЛПР. Первоначально передбачено режим навчання (с послідуючим тестуванням) в результаті котрого ЛПР отримує необхідні навички роботи, підвищуючи свій кваліфікаційний рівень.

#### 4. Результати моделювання

При аналізі ефективності пропонуваного ПДК ППР визначалися змінення  $K_{ТГ}$  или  $K_{КГ}$  в залежності от об'єму доступних ресурсів, моменту прийняття рішень, конфігурації вичислювальної середовища и структури ее вузлів.

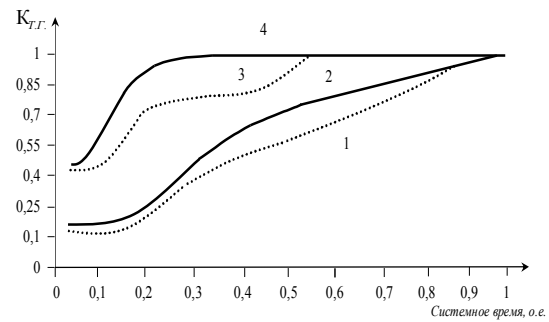
Некотірє результати цього аналізу представлєні на рис. 4, причєм в якості исходних даних рассматривалось десяти суперпозицій графів задач, т.е. значок « $\wedge$ » в записи  $G = (G_1^k \wedge G_5^k)$  означаєт, что одночасно виконувалась обробка ІВР, описуваних графами  $G_1$ ,  $G_5$ , а верхній індекс  $k$  відповідаєт случию, когда ресурси для обробки описуваних ІВР распределены на основе ПДК ППР,  $G = (G_1 \wedge G_5)$  – иначе.

#### Заключення

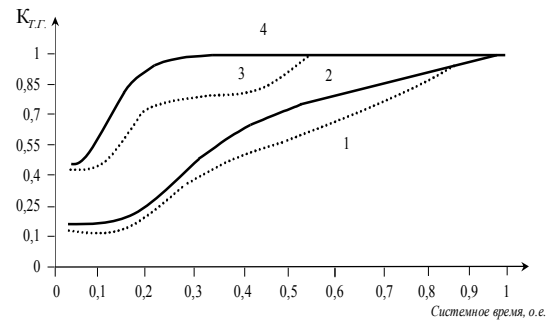
В роботі пропонуєні інформаційні технології, орієнтовані на підтримку прийняття рішень по термінальному розподіленню вичислювальних ресурсів критических інфраструктур. Розробтанний програмно-діалоговий комплекс дозволяє в реальному масштабі часу забезпечити високу термінальну готовність розподєленої критическої інфраструктури; здійснено експериментальне підтвердження ефективності его використання.

#### Список літератури

1 Скатков А.В. Обеспечение гарантоспособности распределенной вычислительной системы на основе моделей диспетчеризации / А.В. Скатков, Д.Ю. Воронин // Радиоелектронные и компьютерные системы. – 2009. – №5 (39). – С. 31-38.



а



б

Рис. 4. Залежність  $K_{ТГ}$  от моменту прийняття рішення (а) и общего об'єму ресурсів (б) для різних графів задань:

- 1, 5 –  $(G_1 \wedge G_5)$ ; 2, 6 –  $(G_1^k \wedge G_5^k)$ ;  
 3 –  $(G_1 \wedge G_2 \wedge G_3)$ ; 4 –  $(G_1^k \wedge G_2^k \wedge G_3^k)$ ;  
 7 –  $(G_4 \wedge G_1 \wedge G_2 \wedge G_4)$ ; 8 –  $(G_4^k \wedge G_1^k \wedge G_2^k \wedge G_4^k)$ ;  
 9 –  $(G_2 \wedge G_2 \wedge G_2 \wedge G_2)$ ; 10 –  $(G_2^k \wedge G_2^k \wedge G_2^k \wedge G_2^k)$ .

2. Воронин Д.Ю. Оперативная диспетчеризация в распределенных вычислительных системах на основе нейросетевых моделей / Д.Ю. Воронин // Радиоелектронные и компьютерные системы. – 2010. – №6 (47). – С. 73-77.

3. Информационные технологии для критических инфраструктур: монография / А.В. Скатков [и др.] – Севастополь: Изд-во «СевНТУ», 2012. – 306 с.

4. Воронин Д.Ю. Технологии Web, Grid, Cloud для гарантоспособных ИТ-инфраструктур: Монография / Под ред. В.С. Харченко, А.В. Горбенко / Д.Ю. Воронин, А.В. Скатков, В.С. Харченко. – Х.: ХАИ, 2013. – 868 с

5. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков.

#### УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ПРИ КРИТИЧНІЙ ІНФРАСТРУКТУРНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

О.В. Скатков, Д.Ю. Воронін

Запропоновані інформаційні технології, орієнтовані на підтримку прийняття рішень з управління ресурсами при критичній інфраструктурній взаємодії в умовах невизначеності. Розроблений інструментальний засіб дозволяє в реальному масштабі часу забезпечити гарантоздатність критичної інфраструктури. Наводяться результати моделювання.

**Ключові слова:** дефіцит апріорної інформації, імітаційне моделювання, підтримка прийняття рішень, розподіл ресурсів, оцінка критичних подій, критичні інфраструктури.

**RESOURCE MANAGEMENT WITH CRITICAL INFRASTRUCTURE INTERACTION  
UNDER UNCERTAINTY**

A.V. Skatkov, D.Y. Voronin

*In this paper we propose information technology oriented on decision making support for resource management with critical infrastructure interaction under uncertainty. The developed tool allows to ensure dependability of critical infrastructure in real-time. The simulation results are presented.*

**Keywords:** *deficiency of a priori information, simulation, decision making support, resource allocation, evaluation of critical events, critical infrastructure.*