

УДК 004.45:004.94

А.В. СКАТКОВ, Д.Ю. ВОРОНИН

*Севастопольский национальный технический университет, Украина*

## УПРАВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИМИ ИНФРАСТРУКТУРАМИ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУР КОМПЛЕМЕНТАРНОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

*Рассматривается задача управления функционированием критических инфраструктур (КИ) при использовании процедур комплементарной диспетчеризации продукта. С этой целью вводится понятие относительного валового продукта КИ, который является количественной оценкой динамики КИ с точки зрения обеспечения ее потенциала. Попытки решения данной задачи ведут к разработке специализированных информационных технологий, которые способны парировать дефицит априорной информации на основе адаптивного подхода к поиску функциональных моделей диспетчеризации продукта при асимптотической минимизации потерь и кластеризации факторного пространства информационных ситуаций в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** критические инфраструктуры, комплементарная диспетчеризация продукта, адаптивный выбор вариантов, потенциал критической инфраструктуры.

### Введение

Среда обитания и жизнедеятельности современного социума во многом определяется взаимодействием энергетических, транспортных, производственных и экологических систем, которые являются критическими в том смысле, что незначительные сбои при их функционировании могут привести к авариям в большинстве случаев носящих характер катастроф. Таким образом, в настоящее время вопросам обеспечения гарантоспособности критических инфраструктур (КИ) уделяется особое внимание [1]. Основная проблематика, связанная с дальнейшим развитием научных знаний в данной области, состоит в необходимости углубленной проработки вопросов формализации КИ, так как развитие информационных технологий поддержки принятия решений по синтезу и управлению КИ должно основываться на учете особенностей организации функционирования таких систем. Данное противоречие может быть разрешено при помощи разработки соответствующего адекватного математического аппарата, на базе которого, в дальнейшем, будет возможна разработка специальных вопросов, доведенных до уровня инженерных решений.

Процессы принятия решений в КИ сопряжены с необходимостью в режиме реального времени обеспечить баланс между различными подсистемами, имеющими противоречивые целевые функции. Таким образом, к результативности структуры КИ, целенаправленности ее функционирования и рациональному взаимодействию ее элементов предъявляются повышенные требования. Основная проблематика, связанная с развитием научных знаний этой в

области обусловлена отсутствием эффективных информационных технологий комплементарной диспетчеризации продукта, т.е. ориентированных на обеспечение потенциала КИ.

### 1. Постановка задачи

Потенциал КИ – достижимый максимум эффективности функционирования КИ, который возможно обеспечить только при наилучшем варианте организации КИ и наиболее благоприятном характере взаимодействия ее структурных элементов. Мерой потенциала, достигнутого на  $b$ -ом такте управления КИ, может быть, например, относитель-

ный объем валового продукта 
$$\Pi_b = \frac{\sum_i h_i^b \omega_{i*}^b}{\max_{t \in [0; T]} \sum_i h_i^t \omega_{i*}^t},$$

где  $i$  – номер подсистемы КИ,  $T$  – время деградации КИ,  $h_i^t$  – стоимость единицы продукта, вырабатываемого  $i$ -ой подсистемой КИ, в момент времени  $t$ ;  $\omega_{i*}^t$  – объем продукта, синтезированного  $i$ -й подсистемой КИ, в момент времени  $t$ . Здесь и далее верхний индекс указывает момент времени.

Необходимо отметить, что для синтеза продукта в объеме  $\omega_{i*}^t$  необходимо соблюсти ограничение

$$\forall q \in \{1, 2, \dots, z\}: \left( \tilde{d}_{i,q}^t \geq d_{i,q}^t \right), \quad (1)$$

где  $z$  – число типов ресурсов;  $\tilde{d}_{i,q}^t$  – объем ресурса  $q$ -ого типа, выделенный  $i$ -ой подсистеме КИ в момент времени  $t$ ;  $d_{i,q}^t$  – объем ресурса, необходимый для синтеза  $\omega_{i*}^t$ .

Ресурс рассматривается в широком смысле: процессорные мощности, память, уровень квалификации персонала предприятия, сырье для производства продукции и т.д. Так как ресурсы разнородны, то друг друга они не компенсируют.

Величина  $\Pi_b$  зависит от целенаправленности функционирования и взаимной согласованности всех подсистем КИ, рационального взаимодействия ее элементов и результативности структуры КИ в целом. Очевидно, что отличительное свойство КИ – способность к эволюции – может способствовать обеспечению ее потенциала.

Различают комплементарные (пример на рисунке 1) и некомплементарные, сбалансированные и несбалансированные КИ. Две подсистемы КИ являются комплементарными, если продукт, вырабатываемый  $i$ -ой подсистемой КИ, является ресурсом для синтеза продукта  $j$ -ой подсистемой (и наоборот). В качестве элементарного примера комплементарных подсистем рассмотрим взаимодействие производственной и энергетической подсистемы. Для производства товаров необходима электроэнергия, которая оплачивается за счет средств, полученных от реализации данных товаров. При дефиците электроэнергии производственные мощности будут простаивать и за счет нарушения требований по комплементарной диспетчеризации продукта потенциал КИ не будет достигнут. Очевидно, что некомплементарные системы не могут быть сбалансированными. В несбалансированной КИ выполнение ограничения (1) не означает обеспечения ее потенциала.

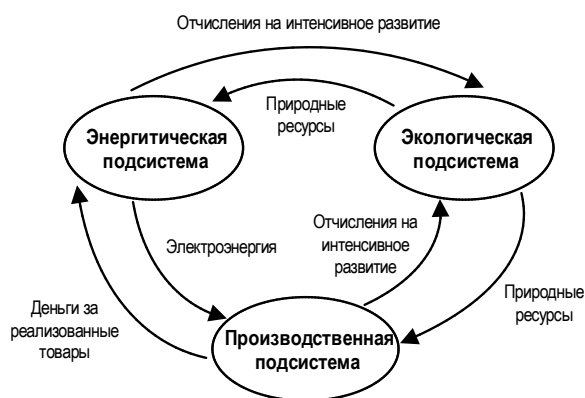


Рис. 1. Пример комплементарной КИ

Задача обеспечения баланса в комплементарной КИ может быть сформулирована на основе принципов, сформулированных в [2]. Имеется  $k$  подсистем КИ, выпускающих разнотипные продукты объемом  $\omega_{i,r}$ , причем  $i, j = 1, \dots, k \cdot n$  – номер подсистемы,  $r = 1, \dots, n$  – тип синтезируемого продукта. Так как КИ является комплементарной, то

для синтеза продукта некоторой подсистемой необходимо выполнять ограничение (1), то есть  $\forall i, j = 1, \dots, k \cdot n$  известны затраты  $c_{j,rp}$ , связанные с переработкой  $j$ -ой подсистемой единицы продукта  $r$ -ого типа (ресурса, используемого при производстве продукта  $r$ -ого типа).

Как правило, в некомплементарных КИ существуют подсистемы, которые производят невостребованный продукт. Таким образом, для комплементарных КИ справедливо равенство (2), учитывающее отсутствие процессов синтеза невостребованного продукта:

$$\forall r = 1, \dots, n : \sum_j \sum_i \omega_{ij,r} = \sum_i \sum_j \omega_{ij,r} , \quad (2)$$

где  $\omega_{ij,r}$  – объем продукта  $r$ -ого типа, поставляемого от  $i$ -ой подсистемы для  $j$ -ой.

Необходимо отметить, что синтезируемый продукт является не только предметом экспорта, но и обеспечивает функционирование и эволюционное развитие КИ. Выражение (3) учитывает, что объем продукта  $r$ -ого типа, потребляемый  $j$ -ой подсистемой является суммой величин  $z_{j,r}$  и  $e_{j,r}$  при отсутствии ограничения  $i \neq j$ .

$$(\forall i, j = 1, \dots, k \cdot n) \wedge (\forall r, p = 1, \dots, n) : \sum_i \omega_{ij,r} = z_{j,r} + e_{j,r} , \quad (3)$$

где  $\sum_i \omega_{ij,r}$  – объем продукта  $r$ -ого типа, поставляемого для  $j$ -ой подсистемы;  $z_{j,r} = \sum_p m_{j,rp} \sum_k \omega_{jk,p}$  – объем внутреннего потребления продукта  $r$ -ого типа для организации функционирования  $j$ -ой подсистемы;  $e_{j,r}$  – объем внутреннего потребления продукта  $r$ -ого типа для эволюционного развития  $j$ -ой подсистемы;  $m_{j,rp}$  – объем продукта  $r$ -ого типа (ресурса), необходимого  $j$ -ой подсистеме для синтеза единицы продукта  $p$ -ого типа.

Балансовое соотношение (3) учитывает функциональные особенности КИ и ее способность к эволюции.

Стоимость переработки продукта из  $r$ -ого типа в  $p$ -ый равна  $S_{rp} = \sum_i \sum_j c_{ij,rp} \omega_{ij,r}$ , где  $c_{ij,rp}$  – затраты, связанные с переработкой  $j$ -ой подсистемой единицы продукта  $r$ -ого типа (полученного от  $i$ -ой подсистемы и используемого  $j$ -ой при производстве продукта  $p$ -го типа).

Модель комплементарного управления КИ (изображенная на рис. 2) для заданных параметров

функционирования КИ и системы ограничений (4), для  $\forall i, j = 1, \dots, k; \forall r, p = 1, \dots, n; t_k \in [0; T]$  осуществляет поиск управления  $u^{t_k} \in U$  ориентированного на обеспечение потенциала КИ; причем

$$C = \left\{ c_{ij,rp}^{t_k} \right\}, \Omega^{\leftarrow} = \left\{ \omega_{*i}^{t_k} \right\}, \Omega^{\rightarrow} = \left\{ \omega_i^{t_k} \right\},$$

$$\Omega = \left\{ \omega_{ij,r}^{t_k} \right\}, E = \left\{ e_{j,r}^{t_k} \right\}.$$

Операторы  $\Phi_I - \Phi_V$  описывают характерные особенности подсистем КИ, например,  $\Phi_{III}$  учитывает эффективность затрат продукта  $r$ -ого типа на эволюционное развитие  $j$ -ой подсистемы.

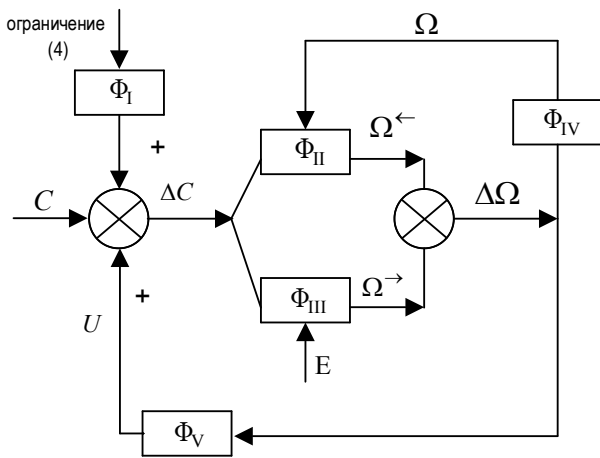


Рис. 2. Структура модели комплементарного управления КИ

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_i \omega_{ij,r}^{t_k} &= \sum_p m_{j,rp}^{t_k} \sum_k \omega_{jk,p}^{t_k} + e_{j,r}^{t_k}; \\ \sum_i \sum_j \sum_r c_{ij,rp}^{t_k} \omega_{ij,r}^{t_k} &\leq \sum_i h_i^{t_k} \omega_i^{t_k}; \\ \forall i, j = 1, \dots, k; \quad \forall r, p = 1, \dots, n; \\ \omega_{ij,r}^{t_k} &\geq 0. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Таким образом, синтез управляющего воздействия  $u^{t_k} \in U$  требует нахождения  $\omega_{ij,r}^{t_k}$ , удовлетворяющего (4).

Для эффективного решения данной задачи нелинейного программирования необходимо разработать специализированные информационные технологии, которые способны парировать дефицит априорной информации на основе адаптивного подхода к поиску функциональных моделей диспетчеризации при асимптотической минимизации потерь и кластеризации факторного пространства информационных ситуаций в реальном масштабе времени.

## 2. Процедуры комплементарной диспетчеризации

Адаптивный выбор функциональной модели комплементарной диспетчеризации продукта реализован с целью компенсации дефицита априорной информации о ряде параметров комплементарного обмена продуктом между подсистемами КИ. Известно, что эффективность алгоритмов адаптивного поиска значительно ухудшается по мере удаления  $t_k \in [0; T]$  от предыдущей точки формирования вектора начальных предпочтений, поэтому в условиях нестационарности информационной ситуации в КИ, в качестве оправданной меры предлагается через некоторое время осуществить сброс накопленной информации и начинать процесс адаптации «с чистого листа», то есть «обнулить память». При помощи параметров  $\chi, \zeta \in T$ , на основании результатов анализа потерь, производится настройка адаптивного выбора вариантов, а именно  $\zeta$  определяет моменты пересчета вектора вероятностей выбора функциональных моделей диспетчеризации продукта,  $\chi$  – моменты «обнуления памяти».

Модель идентификации информационных ситуаций. Обосновано [2], что после «обнуления памяти», для увеличения скорости сходимости адаптивного выбора необходимо формировать вектор начальных предпочтений в соответствии со складывающейся информационной ситуацией, определяемой на основе логико-предикатной сети. Таким образом, класс информационной ситуации определяется при использовании модели IS, осуществляющей отображение  $\langle m_{j,rp}^{t_k}, c_{ij,rp}^{t_k} \rangle$  в  $\text{InfS}(t_k)$ . Использование модели IS при коррекции вектора начальных предпочтений позволило увеличить скорость сходимости адаптивного выбора функциональной модели диспетчеризации на 17-28%.

Комплекс функциональных моделей диспетчеризации. Решение задачи комплементарной диспетчеризации продукта происходит при использовании комплекса, содержащего в себе три альтернативные функциональные модели, имеющие различную область эффективного применения в зависимости от складывающейся информационной ситуации.

Появляется возможность организовать поисковую процедуру, позволяющую обеспечить потенциал КИ, т. е. для всех  $t_k \in [0; T]$  найти  $\langle \omega_{ij,r}^{t_k}, e_{j,r}^{t_k} \rangle$ , обеспечивающий максимум  $\Pi_{t_k}$ , причем  $\langle \omega_{ij,r}^{t_k}, e_{j,r}^{t_k} \rangle = \Psi \left\{ \Omega \left\{ \bar{G}(t_k), D(t_k), R, i, Z, \zeta \right\} \right\}$ ,

$$Z = P_0 \{ c, \text{InfS}(t_k), \chi \}$$

где  $t_k \in [0; T]$  – момент времени;  $[0; T]$  – отрезок времени функционирования КИ;  $\Psi$  – оператор выбора ЛПП варианта диспетчеризации продукта;  $\Omega$  – оператор формирования эффективных вариантов диспетчеризации продукта, полученных на основе функциональной модели, выбранной адаптивно из комплекса альтернативных моделей диспетчериза-

ции продукта;  $i$  – индекс выбранной функциональной модели по диспетчеризации продукта;  $P_0$  – оператор формирования вектора начального предпочтения;  $c$  – индекс, соответствующий версии модуля, выбранного ЛПП из КР-комплекса;  $\text{InfS}(t_k)$  – результат идентификации, который задает класс информационной ситуации в момент времени  $t_k$ ;  $\chi, \zeta$  – управляющие параметры адаптивного выбора.

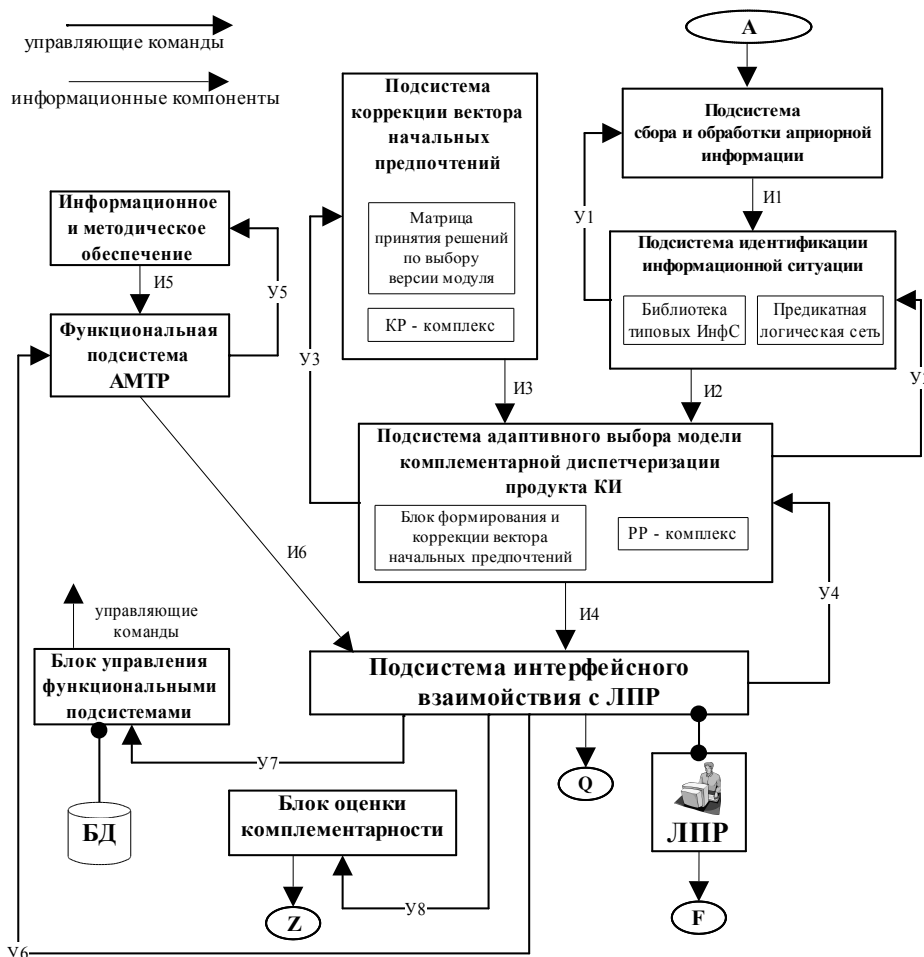


Рис. 3. Функционально-структурная схема системы поддержки принятия решений

по комплементарной диспетчеризации: А – априорная информация о  $\langle m_{j, rp}^{t_k}, c_{ij, rp}^{t_k} \rangle$ ;

F – Выбранное ЛПП эффективное распределение продукта КИ; Q – Апостериорная информация; Z – Значение коэффициента комплементарности для текущего F.

### 3. Система поддержки принятия решений по комплементарной диспетчеризации

Целевым назначением системы поддержки принятия решений по комплементарной диспетчеризации продукта КИ является обеспечение ЛПП в реальном масштабе времени необходимой информацией, используемой при принятии диспетчерских решений, ориентированных на обеспечение потенциала КИ. Структура (рис. 3) обеспечивает под-

держку следующих базовых функций: сбор и обработка априорной информации, идентификация информационной ситуации при использовании модели IS; адаптивный выбор модели из РР-комплекса; коррекция вектора начальных предпочтений на основе многоверсионного КР-комплекса; интерфейс взаимодействия с ЛПП для реализации типовых сценариев с целью получения подмножества эффективных решений.

В программном комплексе предусмотрено несколько сценариев взаимодействия, которые выби-

раются в соответствии с решаемыми функциональными задачами. Кроме того, предусмотрена возможность адаптировать процесс поддержки принятия решений с учетом уровня квалификации ЛПР. Первоначально предусмотрен режим обучения (с последующим тестированием), в результате которого ЛПР получает необходимые навыки работы, повышая свой квалификационный уровень.

### Литература

1. Харченко, В.С. *Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения* [Текст] / В.С. Харченко; под редакцией В.С. Харченко. – Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – 641 с.

2. Леонтьев, В.В. *Избранные произведения в 3т. Т. 1: Общеэкономические проблемы межотраслевого анализа* [Текст] / В.В. Леонтьев. – М.: Экономика, 2006. – 407 с.

3. Скатков, А.В. *Управление вычислительными ресурсами распределенных критических инфраструктур* [Текст] / А.В. Скатков, Д.Ю. Воронин // *Науковий вісник Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти.* – Т. 2, вип. 2. – Чернівці: *Изд-во ЧНУ*, 2011. – С. 6 – 12.

4. Скатков, А.В. *Интеллектуальное управление распределением ресурсов в критических информационных системах* [Текст] / А.В. Скатков, Д.Ю. Воронин // *Материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения», 5-9 сентября 2011 г.* – Севастополь: *Изд-во СевНТУ*, 2011. – С. 216 – 217.

Поступила в редакцию 2.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Твердохлебов, Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия.

### КЕРУВАННЯ КРИТИЧНИМИ ІНФРАСТРУКТУРАМИ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУР КОМПЛЕМЕНТАРНОЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ

*О.В. Скатков, Д.Ю. Воронін*

Розглядається задача керування функціонуванням критичних інфраструктур (КІ) при користуванні процедур комплементарної диспетчеризації продукту. З цією метою вводиться поняття відносного валового продукту КІ, який є кількісною оцінкою динаміки КІ з точки зору забезпечення її потенціалу. Спроби вирішення даної задачі ведуть до розробки спеціалізованих інформаційних технологій, які здатні парировати дефіцит апріорної інформації на основі адаптивного підходу до пошуку функціональних моделей диспетчеризації продукту при асимптотичній мінімізації втрат і кластеризації факторного простору інформаційних ситуацій в реальному масштабі часу.

**Ключові слова:** критичні інфраструктури, комплементарна диспетчеризація продукту, адаптивний вибір варіантів, потенціал критичної інфраструктури.

### MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURES BASED ON PROCEDURES OF THE COMPLEMENTARY SCHEDULING

*A.V. Skatkov, D.Y. Voronin*

The solution of the problem of critical infrastructures (CI) management using the procedures of complementary scheduling is considered. For this purpose, we introduce the concept of relative CI product gross, which is a quantitative assessment of the CI dynamics in terms of its potential. Attempts to solve this problem lead to the development of the specialized information technologies, which are able to fend off the priori information deficit based on an adaptive choice of scheduling functional models with the asymptotic minimization of loss and real-time clustering of the factor space of informational situations.

**Key words:** critical infrastructures, complementary product allocation, adaptive choice, the potential of critical infrastructure.

**Скатков Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой кибернетики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: KVT.sevntu@gmail.com.

**Воронин Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, ассистент кафедры кибернетики и вычислительной техники Севастопольского национального технического университета, Севастополь, Украина, e-mail: dima@voronins.com.