

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---



**В.В. Меньших,**  
*доктор физико-математических наук,  
профессор*



**О.В. Толстых**

### МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТЕ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

### MODEL OF DISTRIBUTION AND ELIMINATION OF INFORMATION SECURITY THREATS ON INFORMATION OBJECT

*Предложена модель распространения различных типов угроз информационной безопасности на объекте информатизации и их устранения средствами системы защиты информации.*

*The model of distribution of various types of threats of information security on an object of informatization is presented and the ways of their elimination by means of an information security system are offered.*

**Введение.** В настоящее время современные информационные технологии активно внедряются в деятельность органов внутренних дел. Однако использование этих технологий, обеспечивая повышение эффективности решения служебных задач сотрудниками, вместе с тем существенно увеличивает риск возникновения угроз информационной безопасности (ИБ) на объектах информатизации. В целях противодействия этим угрозам создаются системы защиты информации (СЗИ) [1].

В связи с этим актуальной является задача выбора варианта системы защиты информации (СЗИ) на объекте информатизации. В интересах решения этой задачи необходимо разработать модель, позволяющую оценивать не только процесс распространения, но и процесс устранения угроз.

Объект информатизации в общем случае включает в себя локальные вычислительные сети, отдельные автоматизированные рабочие места, вспомогательные технические средства и системы. Каждый элемент объекта информатизации может оказаться объектом воздействия нарушителей или оказаться вовлеченным в процесс распространения угроз информационной безопасности в связи с тесной взаимосвязанностью элементов между собой и их территориальным расположением. При этом источники угроз при взаимодействии с элементами объекта информатизации могут порождать различные угрозы этим элементам. Например, некоторые вредоносные программы воздействуют только на файлы определенного типа. Поэтому компьютер, в памяти которого нет файлов данного типа, сам не подвергаясь угрозе, выступает в качестве распространителя угрозы.

Частично данная задача решалась в [2—5], где использовался аппарат теории графов, теории сетей Петри и теории автоматов [6, 7], но в этих публикациях не учитывалась описанная выше особенность распространения угроз ИБ на объектах информатизации, моделирование которой осуществляется в настоящей статье.

Процесс моделирования включает несколько этапов.

**Начальный этап: разработка графовой модели объекта информатизации.**

В каждом объекте информатизации могут быть выделены отдельные компоненты:

совокупность информационных средств, различающихся информационными ресурсами и способами их обработки ( $K$ );

совокупность вспомогательных технических средств, обеспечивающих функционирование информационных систем ( $V$ );

персонал ( $L$ ).

Каждый из компонентов в свою очередь может быть разделен на множество элементов, которые могут подвергаться различным угрозам ИБ. Следовательно, объект информатизации представляет собой многоуровневую иерархическую систему.

Между элементами рассматриваемой системы существуют различного вида взаимоотношения, которые могут способствовать распространению угроз ИБ.

Поэтому для решения задачи обеспечения ИБ объекта информатизации необходимо выявить взаимоотношения между отдельными элементами для изучения их влияния на показатели обеспечения ИБ объекта информатизации в целом в интересах последующей оптимизации этих показателей.

Взаимоотношения между отдельными элементами являются проявлением осуществляемых политик безопасности информационных систем, используемых на данном объекте информатизации. Обратимся к рассмотрению только тех взаимоотношений между элементами компонентов объекта информатизации, которые влияют на распространение угроз ИБ на этом объекте.

Традиционно все взаимоотношения между элементами систем любой природы сводятся к бинарным отношениям следующих основных видов [8]:

топологическим ( $T$ ), характеризующим отношения соответствия элементов друг другу;

функциональным ( $F$ ), характеризующим существование соответствия между элементами, в частности отношения вида «иметь функцию»;

информационным ( $I$ ), характеризующим отношения передачи информации между элементами;

временным, характеризующим причинно-следственные отношения между элементами, в частности отношения типа «завершиться ранее начала выполнения другого действия».

Временные отношения описывают причинно-следственные связи между элементами объекта информатизации, т. е. всегда являются проявлением существующих информационных и функциональных отношений в конкретных ситуациях использования информационных систем, например решении прикладных задач. Следовательно, учет всех информационных и функциональных отношений автоматически приведет к учету и всех временных отношений. Поэтому временные отношения в дальнейшем в работе не рассматриваются.

Данные бинарные отношения можно задать в виде графа  $G = (GV, GE, h)$  с цветными дугами. Вершины  $GV = L \cup V \cup K$  соответствуют множеству всех элементов объекта информатизации, дуги  $GE = T \cup F \cup I$  — множеству всех отношений;  $h$  — функция задания цвета дуг, соответствующая типам угроз информационной безопасности.

Полученный граф  $G = (GV, GE, h)$  описывает общую структуру процесса распространения угроз на объекте информатизации. Для более гибкого описания этого процесса преобразуем полученный граф в Петри-подобную сеть.

**1-й этап: разработка сетевой модели распространения угроз информационной безопасности.**

Преобразуем граф  $G = (GV, GE, h)$  в цветную сеть  $\Psi_1 = (\Sigma, \Theta^{(1)}, h, \lambda_1, \eta_1)$  следующим образом:

- множество вершин  $v_i \in GV$ , соответствующее элементам объекта информатизации, преобразуем во множество позиций  $\sigma_i \in \Sigma_1$ ;

- множество дуг  $e_i \in GE$ , отражающих возможность распространения угроз информационной безопасности, преобразуем во множество переходов  $\theta \in \Theta^{(1)}$ , при этом в отличие от классических сетей, где цветными являются только фишки, будем считать, что переходы так же являются цветными.

Функцию задания цвета переходов будем обозначать, как и в графе,  $h$ , которая задавала цвета дугам этого графа. Отношение инцидентности вершин и дуг в графе  $G$  преобразуем в обобщенные функции входов и выходов  $\eta_1$  и  $\lambda_1$  соответственно:

если вершина  $v_j$ , соответствующая позиции  $\sigma_j$ , является началом дуг  $e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jp}$ , которые были преобразованы в переходы  $\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jp}$ , то

$$\eta_1(\theta_{ji}) = \sigma_j, j_i = 1, \dots, p; \lambda_1(\sigma_j) = \{\theta_{j1}, \dots, \theta_{jp}\};$$

если вершина  $v_k$ , соответствующая позиции  $\sigma_k$ , — конец дуг  $\theta_{k1}, \theta_{k2}, \dots, \theta_{kp}$ , то

$$\lambda_1(\theta_{ki}) = \sigma_k, k_i = 1, \dots, p; \eta_1(\sigma_k) = \{\theta_{k1}, \dots, \theta_{kp}\}.$$

Если на объекте информатизации существует угроза определенного типа, то будем считать, что эта позиция маркирована фишкой, цвет которой соответствует типу угрозы (переходы и фишки, соответствующие одному типу угроз, окрашиваются в один и тот же цвет). Будем считать, что на множестве позиций задана функция  $\mu = (\mu^1, \mu^2, \dots, \mu^n): \sigma \rightarrow N$ , где  $\mu^i(\sigma)$  — количество фишек  $i$ -го цвета в позиции  $\sigma$ .

В соответствии с классической теорией сетей естественно предположить, что переход  $\theta$  цвета  $h$  разрешен, если входная позиция этого перехода  $\sigma' = \eta(\theta)$  имеет  $\mu(\sigma') > 0$ , т.е. во входе позиции перехода  $\theta$  есть хотя бы одна фишка того же цвета, что и переход  $\theta$ .

Срабатывание перехода  $\theta$  означает изменение маркировки его входной позиции  $\sigma'$  и его выходной позиции  $\sigma''$  следующим образом:

$$\mu^i(\sigma') := \mu^i(\sigma') - 1, \mu^i(\sigma'') := \mu^i(\sigma'') + 1.$$

Анализ показывает, что сетевая модель в данном виде не может быть использована для моделирования распространения угроз, т.к. допускает возможность существования конфликтов.

Действительно, если из позиции, соответствующей элементу объекта информатизации, фишка, моделирующая угрозу ИБ  $i$ -го типа, может распространяться на несколько других элементов, это приводит к удалению фишки из позиции, маркирующей эту угрозу. Это означало бы исчезновение угрозы на соответствующем элементе объекта информатизации, что противоречит логике решаемой задачи.

Указанного недостатка можно избежать, если каждую позицию, соответствующую элементу объекта информатизации, преобразовать в так называемую позицию-«ловушку», т.е. позицию, которую не может покинуть ни одна фишка (рис. 1).

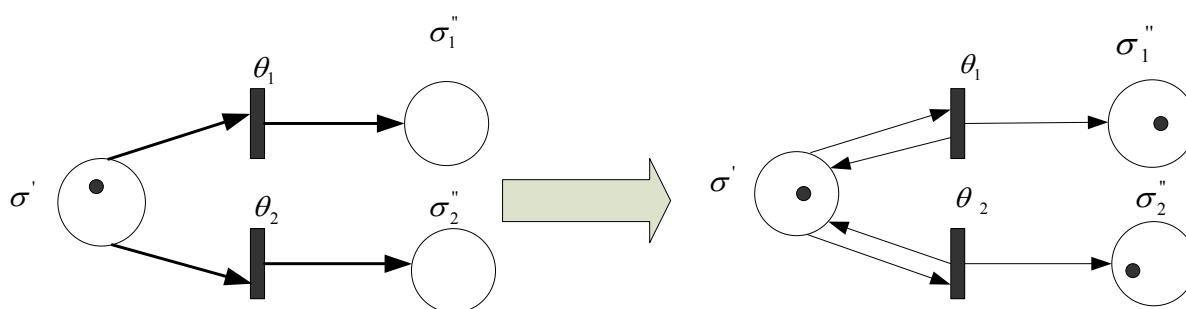


Рис. 1. Преобразование позиций в позиции-«ловушки»

После преобразования получаем сеть  $\Psi_2 = (\Sigma, \Theta^{(1)}, h, \lambda_2, \eta_2)$ , где обобщенные функции входов и выходов  $\eta_2$  и  $\lambda_2$  соответственно задаются следующим образом:

если вершина  $v_j$ , соответствующая позиции  $\sigma_j$ , является началом дуг  $e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jp}$ , которые были преобразованы в переходы  $\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jp}$ , то

$$\eta_2(\theta_{ji}) = \sigma_j, \eta_2(\sigma_j) = \theta_{ji}, j = 1, \dots, p; \lambda_2(\sigma_j) = \{\theta_{j1}, \dots, \theta_{jp}\};$$

если вершина  $v_k$ , соответствующая позиции  $\sigma_k$ , — конец дуг  $\theta_{k1}, \theta_{k2}, \dots, \theta_{kp}$ , то  $\lambda_2(\theta_{ki}) = \sigma_k, \lambda_2(\sigma_k) = \theta_{ki}, k_i = 1, \dots, p; \eta_2(\sigma_k) = \{\theta_{k1}, \dots, \theta_{kp}\}$ .

Будем считать, что с каждым переходом  $\theta$  ассоциируется бинарное отношение  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$  на множестве угроз информационной безопасности — «способствовать появлению».

Будем называть переход  $\theta$ , которому соответствует бинарное отношение  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$ , переходом, оснащенным бинарным отношением  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$ .

Легко видеть, что всегда бинарные отношения  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$  обладают свойством рефлексивности, т. е. для каждой угрозы  $u$  выполняется свойство  $u\mathfrak{R}_\theta^{(1)}u$ . Другие свойства бинарного отношения проявляются в зависимости от ситуации.

Доопределим правила выполнения переходов для переходов, оснащенных бинарным отношением  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$ . Будем считать, что переход  $\theta$ , имеющий цвет  $h^i$ , разрешен, если в его входные позиции  $\sigma' = \eta(\theta) \mu^j(\sigma') \neq 0$ , где  $h^j$  — цвет угрозы  $u_j$ , для которой  $u_j\mathfrak{R}_\theta^{(1)}u_i$ , т. е. в позиции  $\sigma'$  есть фишка, цвет которой соответствует угрозе  $u_j$ , способствующей появлению угрозы  $u_i$ .

Выполнение перехода  $\theta$ , оснащенного бинарным отношением  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$ , означает изменение маркировки его входной позиции  $\sigma'$  и выходной позиции  $\sigma''$ , следующим образом:

$\mu^j(\sigma') - 1 + 1 = \mu^j(\sigma')$ , т. е. маркировка позиции  $\sigma'$  не изменяется в силу того, что эта позиция представляет собой «ловушку»;

$$\mu^j(\sigma'') = \min(1, \mu^j(\sigma') + 1), \quad \mu^i(\sigma'') = \min(1, \mu^i(\sigma') + 1).$$

Будем считать, что с каждым переходом  $\theta$  ассоциируется бинарное отношение  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$  на множестве угроз информационной безопасности — «способствовать появлению».

**2-й этап: разработка сетевой модели, учитывающей возможность устранения угроз информационной безопасности.** Для предотвращения реализации угроз ИБ в соответствии с политикой информационной безопасности используются различные средства защиты, представляющие собой элементы СЗИ. В общем случае элементы СЗИ можно разделить на два типа:

предотвращающие распространение угроз ИБ от одного элемента объекта информатизации к другому;

устраняющие угрозы ИБ на самих элементах объекта информатизации.

Первоначально рассмотрим вопрос моделирования действий элементов СЗИ, осуществляющих предотвращение распространения угроз ИБ между элементами объекта информатизации. Для этого могут быть использованы так называемые сдерживающие дуги.

Каждому элементу СЗИ ставится в соответствие позиция, маркируемая фишками, цвет которых соответствует угрозам, предотвращаемым этим элементом. Сдерживающие дуги направлены от позиций, соответствующих элементам СЗИ, к переходам, соответствующим блокируемым путям распространения угроз информационной безопасности соответствующих типов.

Правило запуска перехода в сетях со сдерживающими дугами следующее: переход является разрешенным, когда фишки того же цвета, что и цвет перехода, присутствуют во всех «обычных» входах, т.е. входах, соответствующих элементам объекта информатизации, и отсутствуют в «сдерживающих» входах, т. е. входах, соответствующих элементам СЗИ. Правило выполнения перехода не изменяется: удаляются фишки из всех его «обычных» входов. Сдерживающая дуга из позиции  $\sigma'$  в переход  $\theta$  графически изображается маленьким кружком (а не стрелкой) у конца дуги, присоединенного к переходу.

$$\text{После преобразования получаем сеть } \Psi_3 = (\Sigma \cup \Xi^{(1)}, \Theta^{(1)}, \mathfrak{R}^{(1)}, h, \lambda_3, \eta_3),$$

где  $\Xi^{(1)}$  — множество позиций, соответствующих элементам СЗИ, препятствующим распространению угрозы ИБ;  $\mathfrak{R}^{(1)}$  — множество бинарных отношений  $\mathfrak{R}_\theta^{(1)}$  для всех  $\theta \in \Theta^{(1)}$ ; обобщенные функции входов и выходов  $\eta_3$  и  $\lambda_3$  не изменяются для ранее введенных переходов, соответствующих элементам объекта информатизации, т.е.

$$\eta_3 \Big|_{\Sigma \cup \Theta} = \eta_2, \quad \lambda_3 \Big|_{\Sigma \cup \Theta} = \lambda_2,$$

и доопределяют ранее используемые функции  $\eta_2$  и  $\lambda_2$  для вновь введенных позиций следующим образом:

если соответствующая элементу СЗИ позиция  $\xi_j$ , может блокировать распространение угроз, описываемых переходами  $\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jp}$ , то

$$\eta_3(\theta_{ji}) = \xi_j, j_i = 1, \dots, p; \{\theta_{j1}, \dots, \theta_{jp}\} \in \lambda_3(\xi_j).$$

Обратимся к рассмотрению вопроса моделирования действий элементов СЗИ, осуществляющих устранение угроз ИБ на самих элементах объекта информатизации. Такие элементы можно моделировать с помощью введения дополнительно позиций-ловушек.

Обозначим  $\Xi^{(2)}$  — множество позиций, соответствующих элементам СЗИ, устраняющим угрозы информационной безопасности на элементах объекта информатизации.

При этом будем считать, что с каждым переходом  $\theta \in \Xi^{(2)}$  ассоциируется бинарное отношение  $\mathfrak{R}_\theta^{(2)}$  на множестве угроз информационной безопасности — «способствовать устранению».

Как и ранее вновь введенные бинарные отношения  $\mathfrak{R}_\theta^{(2)}$  обладают свойством рефлексивности, т. е. для каждой угрозы  $u$  выполняется свойство  $u\mathfrak{R}_\theta^{(2)}u$ . Другие свойства бинарного отношения проявляются в зависимости от ситуации.

Порядок выполнения переходов, оснащенных бинарными отношениями, не изменяется.

После описанного выше преобразования получаем сеть

$$\Psi_4 = (\Sigma \cup \Xi, \Theta, h_4, \lambda_4, \eta_4),$$

где  $\Xi = \Xi^{(1)} \cup \Xi^{(2)}$  — множество позиций, соответствующих элементам СЗИ;

$\Theta = \Theta^{(1)} \cup \Theta^{(2)}$  — переходы, соответствующие процессам устранения угроз ИБ на элементах объекта информатизации;

обобщенные функции входов и выходов  $\eta_4$  и  $\lambda_4$  не изменяются для ранее введенных переходов, соответствующих элементам объекта информатизации, т.е.

$$\eta_4 \Big|_{\Sigma \cup \Xi^{(1)} \cup \Theta^{(1)}} = \eta_3, \quad \lambda_4 \Big|_{\Sigma \cup \Xi^{(1)} \cup \Theta^{(1)}} = \lambda_3,$$

и доопределяют ранее используемые функции  $\eta_2$  и  $\lambda_2$  для вновь введенных позиций следующим образом: если соответствующая элементу СЗИ позиция  $\xi_j$ , может устранять угрозы на элементе объекта информатизации, которому соответствует позиция  $\sigma_i$  с помощью перехода  $\theta$ , то

$$\eta_4(\theta) = \{\xi_j, \sigma_i\}, \quad \lambda_4(\theta) = \xi_j; \quad \eta_4(\xi_j) = \lambda_4(\xi_j) = \theta; \quad \theta \in \lambda_4(\sigma_i);$$

функция раскраски переходов не изменяется для ранее введенных переходов, т.е.

$$h_4 \Big|_{\Theta^{(1)}} = h, \quad \text{и доопределяется для переходов множества } \Theta^{(2)} \text{ в соответствии с функциональными возможностями элемента СЗИ.}$$

**3-й этап: разработка сетевой модели, учитывающей динамику распространения и устранения угроз информационной безопасности.** Во вновь полученной сети  $\Psi_4$  позиции, соответствующие элементам объекта информатизации, уже перестают быть ловушками, так как они могут терять фишки после выполнения переходов из множества  $\Theta^{(2)}$ , соответствующих устранению угрозы. Кроме того, возникает возможность появления конфликтов.

Каждый переход соответствует определенному процессу передачи или устранения угрозы ИБ, эти процессы имеют определенную продолжительность.

Перейдем к рассмотрению временной сети, в которой заданы времена выполнения переходов, т. е. определена функция  $T: \Theta \rightarrow [0, +\infty)$ , ставящая в соответствие каждому переходу  $\theta \in \Theta$  его длительность выполнения  $t \geq 0$ .

Для предотвращения конфликтов введем правило выбора последовательности выполнения выходных переходов для каждой позиции, моделирующей элемент объекта информатизации, определяемое бинарным отношением  $\mathfrak{Z}$  — «выполняться ранее».

Пусть  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s$  — выходные переходы позиции  $\sigma$ , активные в данный момент времени  $t_1, t_2, \dots, t_s$  — длительность выполнения переходов.

Последовательность выполнения переходов определена на основе анализа значений в соответствии со следующим условием:

если  $t_i < t_j$ , то  $\theta_i \mathfrak{Z} \theta_j$ . Тем самым определена сеть  $\Psi_5 = (\Sigma \cup \Xi, \Theta, \mathfrak{R}, \mathfrak{Z}, T, h_5, \lambda_5, \eta_5)$ , где  $h_5 \equiv h_4, \lambda_5 \equiv \lambda_4, \eta_5 \equiv \eta_4$ .

Разработана модель распространения и устранения угроз ИБ на объекте информатизации ОВД, позволяющая учесть возможность возникновения новых типов угроз на отдельных элементах объекта.

**Численный метод реализации сетевой модели.** Для численного представления процессов разработанной выше сети будем использовать матричное представление. Обозначим:

$D^- = (d_{ij}^-)$  — матрицу входов в переходы, определяемую по правилу:

$$d_{jk}^- = \begin{cases} 1, & \text{если позиция } \sigma_j \text{ является входом для перехода } \theta_k \\ 0, & \text{если иначе;} \end{cases}$$

$D^+ = (d_{ij}^+)$  — матрицу выходов из переходов, определяемую по правилу:

$$d_{jk}^+ = \begin{cases} 1, & \text{если позиция } \sigma_j \text{ является выходом для перехода } \theta_k, \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases}$$

$D = D^+ - D^-$  составная матрица изменений.

Для наглядности строки, соответствующие переходам разного цвета, разделяются двойной линией.

$X$  — матрица разрешенных переходов, т.е. таких переходов  $\theta_i$ , для которых в маркировке  $\mu$  выполняется следующее условие:  $\mu \geq X_i \otimes D^-$ , где  $\otimes$  — матричная операция логического умножения, которая определяется по следующему правилу:

если  $A = (a_{ij})$ , где  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, B = (b_{jk})$ , где  $j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, l$  — логические матрицы, то  $C = A \otimes B$  — логическая матрица, такая, что  $c_{ik} = \bigvee_{j=1}^m a_{ij} \wedge b_{jk}$ .

$\mathfrak{R}$  — матрица соответствующих разрешенным переходам бинарных отношений. Маркировка  $\mu$  задается отдельно для каждого цвета фишек.

Для пояснения способа формирования этих матриц рассмотрим пример сети, содержащей переходы 3 цветов (рис. 2).

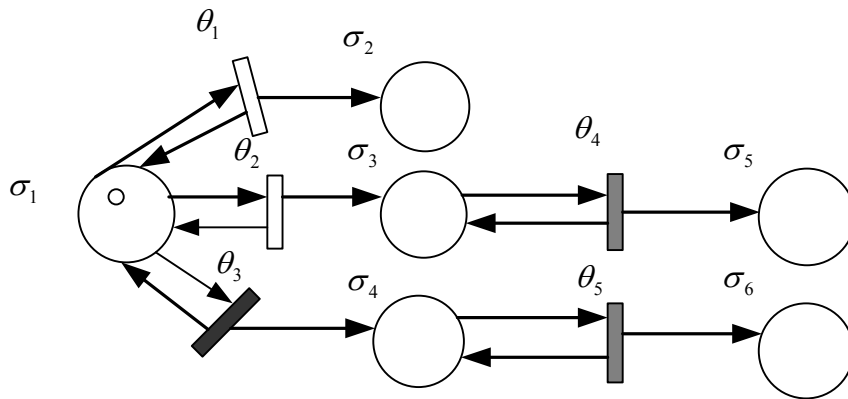


Рис. 2. Пример трехцветной сети

Матрицы, описывающие эту сеть, имеют следующий вид:

$$D^- = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, D^+ = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$X_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mu = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

После выполнения разрешенных переходов  $\theta_1, \theta_2$  сеть получает маркировку  $\mu^1$ , в соответствии с которой позиции  $\sigma_2, \sigma_3$  получат не только белую, но и серую и черную фишки (рис. 3).

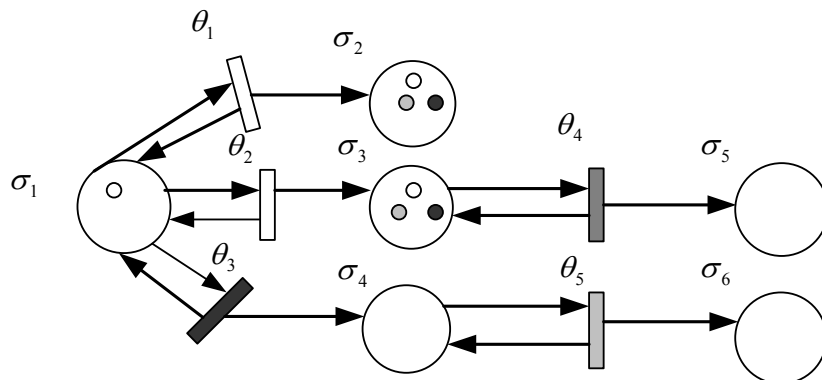


Рис. 3. Сеть после выполнения разрешенных переходов



Достижимая маркировка сети определяется по формуле:  $\mu^1 = \mu \vee (x \vee \mathfrak{R}) \otimes D$ , которая развернуто представляется следующим образом:

$$\mu^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vee \left( \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right) \otimes \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

**Заключение.** Разработанная математическая модель и численный метод позволяют имитировать процесс распространения и устранения угроз информационной безопасности на объектах информатизации органов внутренних дел, что может быть использовано при проектировании или модификации систем защиты информации этих объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко В.А., Малюк А.А. Основы защиты информации: учебник для высших учебных заведений Министерства общего и профессионального образования РФ. — М.: МИФИ, 1997. — 538 с.
2. Меньших В.В., Лунев Ю.С. Моделирование действий дестабилизирующих факторов на распределенные информационные системы с помощью аппарата сетей Петри // Системы управления и информационные технологии. — 2008. — № 1(31). — С. 71—75.
3. Меньших В.В., Петрова Е.В. Применение методов теории автоматов для моделирования информационных процессов // Вестник Воронежского института МВД России. — 2009. — № 1. — С. 121—130.
4. Меньших В.В., Петрова Е.В. Синтез автоматной модели функционирования информационной системы в условиях воздействия угроз информационной безопасности // Инженерная физика. — 2010. — № 3. — С. 43—44.
5. Меньших В.В., Толстых О.В. Моделирование возникновения угроз информационной безопасности на объекте информатизации // Информация и безопасность. — 2011. — Вып. 1. — С. 117—120.
6. Кудрявцев В. Б., Алешин С. В., Подколотин А.С. Введение в теорию автоматов. — М.: Наука, 1985. — 320 с.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
8. Логико-лингвистические модели в военных системных исследованиях / Н.Г. Бублик [и др.]; под ред. Е.А. Евстигнеева. — М.: Военное издательство, 1988. — 232 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Меньших Валерий Владимирович. Начальник кафедры высшей математики. Доктор физико-математических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: mensikh@yml.ru

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 2623397.

Толстых Ольга Владимировна. Адьюнкт кафедры высшей математики.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: tov48@mail.ru

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 2623397.

Mensikh Valery Vladimirovich. Chief of the chair of Higher Mathematics. Doctor of physical and mathematical sciences, professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 2623397.

Tolstykh Olga Vladimirovna. Post-graduate cadet of the chair of Higher Mathematics.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 2623397.

**Ключевые слова:** угрозы информационной безопасности; модель распространения и устранения; объект информатизации.

**Key words:** threats of information safety; distribution and elimination model; object of informatization.

УДК 004.056:519.1

### ИЗДАНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО ИНСТИТУТА МВД РОССИИ



Распознавание и оценка угроз информационной безопасности территориальным сегментам Интегрированной мультисервисной телекоммуникационной системы органов внутренних дел: теоретические и организационно-методические основы: монография / С.В. Скрыль [и др.]. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012.—139 с.

Изложены проблемы обнаружения и идентификации воздействия угроз нарушения конфиденциальности информации. С позиций системного подхода, методологии моделирования систем и теории распознавания рассматриваются современная постановка проблемы, концептуальные основы применения различных типов моделей для синтеза алгоритмов распознавания угроз нарушения конфиденциальности информации территориальных сегментов ИМТС ОВД. Отражены вопросы формирования критериев оценки защищенности информационных процессов в этих сегментах с использованием обоснованных в работе моделей угроз.

Издание рассчитано на научных работников, аспирантов, профессорско-преподавательский состав вузов, а также специалистов в области информационной безопасности.



**Н.В. Даценко,**  
кандидат технических  
наук, доцент



**С.А. Горбатенко,**  
доктор технических наук,  
профессор



**В.В. Горбатенко,**  
кандидат физико-матема-  
тических наук , доцент

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОНСУЛЬТАТИВНОЙ СИСТЕМЕ  
МЕДИКО-КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ  
ОТРАВЛЕНИЙ**

**DECISION-MAKING ALGORITHMIC PROCEDURES  
IN COMPUTER-BASED CONSULTATIVE SYSTEM OF MEDICAL  
FORENSIC POISONING EXAMINATION**

*Рассмотрены вопросы разработки алгоритмов автоматизированной консультативной системы медико-криминалистической экспертизы отравлений, позволяющей оперативно формировать достоверные экспертные заключения по делам о расстройстве здоровья и смерти от воздействия химических факторов на основе неполных, неточных, противоречивых данных.*

*The paper is dedicated to the questions of algorithms development of computer-based consultative system of medical forensic poisoning examination that permit to form rapidly truthful expert conclusions for cases of health disorder because of chemical factors effect on the base of incomplete, inexact, contradictory data.*

**Введение**

В условиях непрерывного роста уровня преступности важное значение при расследовании гражданских и уголовных дел приобретает медико-криминалистическая экспертиза (МКЭ), так как экспертное заключение является одним из основных источников доказательств в следственном и судебном процессах. В настоящее время, по данным уголовной статистики, возросло число умышленных отравлений, в связи с чем все случаи скоропостижной смерти анализируются экспертами с точки зрения возможности отравления. Таким образом, количество уголовных дел, требующих производства

медико-криминалистической экспертизы воздействия химических факторов, значительно увеличилось.

Процесс производства МКЭ отравлений постоянно усложняется в связи с непрерывным расширением номенклатуры ядовитых веществ. Кроме того, существует вероятность совершения ошибок при формировании экспертного заключения, связанная с субъективными факторами, и, в первую очередь, с квалификацией эксперта. Большое значение для следственного производства имеет оперативность формирования выводов, так как, по статистике, большинство преступлений против здоровья и жизни граждан раскрывается на этапе предварительного расследования. Однако эксперт не всегда может обеспечить требуемую следствием оперативность получения заключения из-за необходимости обработки большого объема данных, которые нередко бывают неполными, неточными, противоречивыми. В связи с этим производство МКЭ с использованием существующих методов оказывается неэффективным с точки зрения обеспечения достоверности и оперативности экспертизы.

Одним из наиболее эффективных путей решения указанных проблем является разработка алгоритмов процесса производства МКЭ воздействия химических факторов и создание на их основе автоматизированной консультативной системы (АКС), позволяющей оперативно формировать достоверные экспертные заключения по делам о расстройстве здоровья и смерти от воздействия химических факторов на основе следственных данных, в том числе неполных, неточных, противоречивых [1, 2].

### 1. Структурирование знаний предметной области

В связи с тем что методы формирования экспертных заключений носят эвристический характер, при разработке АКС использованы принципы искусственного интеллекта, позволяющие решать неформализуемые задачи. Для представления знаний предметной области применяется продукционная модель, так как, во-первых, модификация одних продукций может осуществляться относительно независимо от других продукций; во-вторых, наличие в продукциях указателей на сферу применения позволяет эффективно организовать базу знаний (БЗ) и, тем самым, повысить оперативность поиска информации.

Продукции представлены в базе знаний автоматизированной консультативной системы в следующем виде [3]:

$$Pr = \langle i; L; A \Rightarrow G; MD_{Pr}; MN_{Pr} \rangle, \quad (1)$$

где  $i$  — порядковый номер продукции;  $L$  — сфера применения продукции («кислоты», «щелочи» и т.д.);  $MD_{Pr}$  и  $MN_{Pr}$  — соответственно мера доверия и мера недоверия гипотезе  $h$ , выводимой из продукции, при условии истинности посылок (для получения значений  $MD_{Pr}$  и  $MN_{Pr}$  используется метод направленного опроса специалистов);  $A \Rightarrow G$  — ядро продукции:

$$\text{ЕСЛИ } A_1 \text{ и/или...} A_k, \text{ ТО } G_1 \text{ и/или...} G_q, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (2)$$

где  $A$  — посылки (антецеденты);  $G$  — действия, которые нужно предпринять, если посылки будут удовлетворены (консеквенты).

Знания структурированы экспертами в БЗ виде совокупности множеств  $Z = \{Z_1, \dots, Z_N\}$ , каждое из которых содержит продукции, относящиеся к определенной сфере предметной области, упорядоченные по степени детализации априорной информации — от общей (например, данных, полученных после осмотра места происшествия) к специфической (результатов судебно-химических, судебно-биологических исследований,

вскрытия и т.п.). Таким образом в базе знаний определены статические приоритеты продукции с целью исключения необходимости проведения дополнительных экспертиз в том случае, когда можно сформировать достоверное заключение на основе уже рассмотренных продукции — тем самым обеспечивается оперативность получения выводов.

## 2. Алгоритмическая процедура вывода заключений на основе неполной и/или неточной информации

Как сказано выше, в экспертной практике часто приходится делать выводы на базе неполных и/или неточных априорных данных. Неполнота следственной информации объясняется тем, что организм каждого человека индивидуален, и при отравлении ядовитым веществом проявляются не все симптомы, для него характерные, и, наоборот, имеются свидетельства, указывающие на воздействие других ядов, что может являться, например, следствием обострения хронических заболеваний у пострадавшего. Неточность информации связана с тем, что многие симптомы характерны для целого ряда ядов, но играют разную диагностическую роль для каждого из этих веществ. Для обеспечения возможности вывода заключений на основе неточной и/или неполной информации в АКС используется следующая алгоритмическая процедура. С каждой продукцией связан коэффициент надежности ( $КН_{Pr}$ ), а с каждой посылкой — коэффициент уверенности ( $КУ_{Pr}$ ), выражающие соответственно большую (или меньшую) достоверность продукции и посылки. Причем  $КН_{Pr}$  вычисляется следующим образом [4]:

$$КН_{Pr} = МД_{Pr} - МНД_{Pr}, \quad (3)$$

где  $КН_{Pr}$  — уверенность в гипотезе  $h$ , выводимой из продукции, при условии выполнения посылок  $A$  (свидетельствах  $e$ ).

Комбинации посылок  $A_1$  и/или... $A_k$  представим в виде множества  $V = \{b_r\}$ ,  $r = \overline{1, R}$ , а все известные на данный момент свидетельства — в виде множества  $E = \{e_\omega\}$ ,  $\omega = \overline{1, \Omega}$  [4]. При поступлении свидетельства  $e_\omega$  в рабочую память системы осуществляется просмотр базы знаний с целью выявления продукции, посылки которой совпадают с  $e_\omega$ . Если такая продукция найдена, то коэффициент уверенности  $m$ -й гипотезы с учетом свидетельства  $e_\omega$  вычисляется с помощью выражения:

$$КУ_{h_m}[e_\omega] = КН_{Pr}[e_\omega] \cdot КУ_{b_r}[e_\omega], \quad (4)$$

где  $КН_{Pr}[e_\omega]$  — коэффициент надежности продукции, посылки которой совпадают с  $e_\omega$ ;  $КУ_{b_r}[e_\omega]$  — обобщенный коэффициент уверенности посылки  $b_r$ , совпадающей с  $e_\omega$ , который определяется следующим образом:

- 1) если в  $r$ -й продукции имеется операция конъюнкции  $A_1(KY_1) \text{ И } \dots \text{ И } A_k(KY_k)$ , то
 
$$КУ_{b_r}[e_\omega] = \min(KY_1, \dots, KY_k); \quad (5)$$

- 2) если используется операция дизъюнкции  $A_1(KY_1) \text{ ИЛИ } \dots \text{ ИЛИ } A_k(KY_k)$ , то
 
$$КУ_{b_r}[e_\omega] = \max(KY_1, \dots, KY_k). \quad (6)$$

При появлении дополнительной информации (свидетельства  $e_\lambda$ ,  $\lambda = \overline{1, \Omega}$ ), указывающей в пользу  $m$ -й гипотезы, коэффициент уверенности вычисляется с помощью выражения:

$$КУ_{h_m}[e_\omega, e_\lambda] = КУ_{h_m}[e_\omega] + КУ_{h_m}[e_\lambda] \cdot (1 - КУ_{h_m}[e_\omega]), \quad (7)$$

где свидетельство  $e_\lambda$  следует за  $e_\omega$ ;  $KY_{h_m}[e_\lambda]$  определяется по формуле (4).

Коэффициент уверенности принимает значения в интервале  $[0;1]$ . Согласно мнениям экспертов, всякий факт, для которого  $KY_{h_m} \leq 0.2$ , рассматривается как мало-надежный, и гипотеза может быть отвергнута [5].

### 3. Алгоритмы разрешения конфликтов логического вывода

При производстве медико-криминалистической экспертизы априорная информация часто носит противоречивый характер, что объясняется как индивидуальными особенностями организма, так и различными субъективными факторами (например, противоречивыми свидетельскими показаниями). В связи с этим в процессе вывода экспертного заключения возникают конфликты между продукциями и между гипотезами. В том случае, когда становятся истинными посылки нескольких продукций, появляется проблема определения порядка их актуализации, то есть возникает конфликт между продукциями. При этом продукции конфликтного набора могут принадлежать как одному множеству  $Z_n$ , так и нескольким множествам ( $Z_n, n = \overline{1, M}$ ).

В первом случае приоритет продукции определяется в АКС путем последовательного ранжирования продукций. Наличие номера  $i$  у каждой продукции позволяет применить методы сортировки числовой информации: с помощью сортировки по возрастанию определяются наиболее приоритетные продукции (с наименьшими номерами), позволяющие оперативно осуществить вывод экспертного заключения. С целью уменьшения объема вычислений используется информация из рабочей памяти (базы данных): если продукция из конфликтного набора уже выполнялась во время текущего процесса производства МКЭ отравлений, то второй раз она исключается из рассмотрения.

Для разрешения конфликта между продукциями, принадлежащими нескольким множествам, в АКС используется следующий алгоритм:

- 1) исключение из конфликтных наборов продукций, найденных в базе данных;
- 2) сортировка продукций в каждом из  $M$  конфликтных наборов по возрастанию порядковых номеров;
- 3) сортировка конфликтных наборов по уменьшению значений коэффициентов надежности продукций, стоящих первыми в каждом из  $M$  наборов;
- 4) последовательная активизация отсортированных конфликтных наборов.

В ситуации, когда в процессе логического вывода коэффициенты уверенности нескольких гипотез принимают значение  $KY_{h_j} \geq 0.2, j = \overline{1, f}$ , возникает конфликт между гипотезами. При этом необходимо найти наиболее достоверную из них, то есть определить направление дальнейшего вывода. Так как достоверность гипотез оценивается с помощью коэффициентов уверенности, который у конфликтующих гипотез принимает значение в интервале  $[0,2; 1]$ , то для разрешения конфликта гипотез используется правило Байеса в виде:

$$KY_C(h_m) = \frac{KY_{h_m} \cdot KY_{h_m}(C)}{\sum_{j=1}^f KY_{h_j} \cdot KY_{h_j}(C)}, \quad (8)$$

где  $KY_{h_m}$  — априорные коэффициенты уверенности гипотез;  $KY_{h_m}(C)$  —  $KY$  гипотез при условии, что событие  $C$  (появление дополнительной информации) произошло.

Например, в случае конфликта двух гипотез D («отравление ядовитым веществом 1») и F («отравление ядовитым веществом 2») необходимо выяснить, какая из следующих гипотез, образующих полную группу событий, является наиболее достоверной:

$$h_1 = D\bar{F}, \quad h_2 = \bar{D}F, \quad h_3 = DF, \quad h_4 = \bar{D}\bar{F}. \quad (9)$$

Гипотеза  $h_4$  исключается из рассмотрения, поскольку коэффициенты уверенности гипотез D и F в процессе логического вывода приняли значение  $\geq 0.2$ , то есть имеется достаточно оснований считать, что события D и/или F произошли. Коэффициенты уверенности остальных гипотез вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{КУ}_{h_1} &= \text{КУ}(D) \cdot (1 - \text{КУ}(F)); \\ \text{КУ}_{h_2} &= \text{КУ}(F) \cdot (1 - \text{КУ}(D)); \quad \text{КУ}_{h_3} = \text{КУ}(D) \cdot \text{КУ}(F). \end{aligned} \quad (10)$$

КУ гипотез при появлении дополнительных данных определяются с помощью выражения (7):

$$\text{КУ}_{h_m}(C) = \text{КУ}_{h_m} + \text{КУ}'_{h_m} \cdot (1 - \text{КУ}_{h_m}), \quad m = \overline{1,3}, \quad (11)$$

где  $\text{КУ}'_{h_1}, \text{КУ}'_{h_2}, \text{КУ}'_{h_3}$  вычисляются по формуле (4):

$$\text{КУ}'_{h_1} = \text{КН}_1 \cdot \text{КУ}_{A_1}, \quad \text{КУ}'_{h_2} = \text{КН}_2 \cdot \text{КУ}_{A_2}, \quad \text{КУ}'_{h_3} = \text{КН}_3 \cdot \text{КУ}_{A_3}, \quad (12)$$

где  $\text{КН}_1, \text{КН}_2, \text{КН}_3$  — коэффициенты надежности продукций, antecedentes которых стали истинными при поступлении дополнительной информации, а консеквенты представляют собой гипотезы  $h_1, h_2, h_3$  соответственно;  $\text{КУ}_{A_1}, \text{КУ}_{A_2}, \text{КУ}_{A_3}$  — обобщенные КУ посылок этих продукций.

Затем вычисляются коэффициенты уверенности конфликтующих гипотез по формуле (8). Если в результате вычислений окажется, что  $\text{КУ}_C(h_m) > \text{КУ}_C(h_j), j = \overline{1,2}$ , то гипотеза  $h_m$  считается наиболее достоверной, а гипотезы  $h_j$  исключаются из рассмотрения.

#### 4. Вывод заключений в автоматизированной консультативной системе медико-криминалистической экспертизы отравлений

Предложенные выше алгоритмы объединены в рамках автоматизированной консультативной системы медико-криминалистической экспертизы отравлений, реализующей логический вывод экспертных заключений. Процесс формирования заключений осуществляется с помощью прямой цепочки вывода циклическим способом [6]. В каждом цикле просматриваются все продукции базы знаний с целью выявления тех, посылок которых совпадают с известными на данный момент фактами из рабочей памяти. После нахождения релевантной продукции она активизируется, и ее консеквент заносится в рабочую память, цикл повторяется сначала. В каждом цикле может быть выполнена только одна продукция. В том случае, если имеется несколько релевантных продукций, выбор наиболее приоритетной из них осуществляется с помощью алгоритмов разрешения конфликта между продукциями.

Возможность формирования заключений на основе неточных и/или неполных данных обеспечивается за счет использования в АКС алгоритмической процедуры вывода экспертных заключений. При возникновении конфликта между гипотезами направление дальнейшего вывода определяется в автоматизированной консультативной системе с помощью алгоритма, основанного на правиле Байеса, после чего полученная информация записывается в рабочую память АКС, и вывод продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все релевантные продукции. По окончании процесса логического вывода выда-

ется экспертное заключение в виде «На основе введенных данных установлено, что произошло отравление ядовитым веществом F с уверенностью W».

### **Заключение**

Алгоритмические процедуры принятия решений в консультативной системе медико-криминалистической экспертизы отравлений, реализующие логический вывод экспертных заключений, позволяют повысить достоверность решений за счет уменьшения влияния субъективных факторов и увеличить оперативность их формирования путем использования вычислительной техники при обработке большого объема данных (в том числе неточных, неполных, противоречивых).

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Даценко Н.В. Повышение достоверности заключений при производстве медико-криминалистической экспертиз воздействия химических факторов // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: материалы XIV Международной научной конференции. — М.: Академия управления МВД России, 2005. — С. 467—472.

2. Горбатенко С.А., Горбатенко В.В., Даценко Н.В. Автоматизированная консультативная система как средство повышения эффективности судебно-медицинской экспертной практики // Совершенствование следственной и экспертной практики: тезисы докладов Международной научно-практической конференции. — Омск: Омская академия МВД России, 2008. — С. 115—116.

3. Даценко Н.В. Структурирование информации в консультативной системе медико-криминалистической экспертизы воздействия химических факторов // Моделирование, теория, методы и средства: тезисы докладов Международной научно-практической конференции. Ч.6. — Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет, 2001. — С. 15—16.

4. Горбатенко С.А., Даценко Н.В. Формирование экспертных заключений в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии на основе неопределенной априорной информации // Современные информационные технологии и ИТ-образование: IV Международная научно-практическая конференция. — М.: МГУ им. Ломоносова, 2009. — URL: [http://2009.it-edu.ru / pages/Conference-works](http://2009.it-edu.ru/pages/Conference-works) (дата обращения: 03.07.2012).

5. Брукинг А. Экспертные системы. Принципы работы и примеры: пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1987. — 224 с.

6. Даценко Н.В. Информационные технологии в процессе производства медико-криминалистической экспертизы отравлений // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: материалы XII Международной научной конференции. — М.: Академия управления МВД России, 2003. — С. 428—434.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Даценко Наталия Валерьевна. Доцент кафедры вневедомственной охраны. Кандидат технических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: natdatsenko@rambler.ru

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-32-57.

Горбатенко Светлана Александровна. Начальник кафедры радиоэлектронных устройств. Доктор технических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: sv\_gorbatenko@rambler.ru

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-32-57.

Горбатенко Владимир Валентинович. Доцент кафедры радиоэлектронных устройств. Кандидат физико-математических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: vorhmscl@comch.ru

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (4732) 476-467.

Datsenko Natalia Valerievna. Assistant professor of Non-department Guard chair. Candidate of sciences (technics), assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)262-32-57.

Gorbatenko Svetlana Alexandrovna. Chief of Radio-Electronic Means chair. Doctor of sciences (technics), professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel.(473)262-32-57.

Gorbatenko Vladimir Valentinovich. Assistant professor of the Radio-Electronic Means chair. Candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (4732) 476-467.

**Ключевые слова:** повышение достоверности и оперативности экспертизы; автоматизированная консультативная система медико-криминалистической экспертизы отравлений; структурирование продукционной базы знаний; алгоритмическая процедура неточного вывода экспертных заключений; алгоритмические процедуры разрешения конфликтов логического вывода.

**Key words:** forensic medical examination adequacy and quickness increase; computer-based consultative system of medical forensic poisoning examination; structuring production knowledge base; algorithmic procedure of expert conclusions inexact deduction; algorithmic procedures of inference conflicts resolution.

**УДК 681.3, 343.9**



**Р.А. Солодуха,**  
кандидат технических наук, доцент



**И.В. Атласов,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

## **МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА “PAIR OF VALUES” ДЛЯ АТАКИ НА ОСНОВАНИИ ИЗВЕСТНОГО СТЕГАНОВЛОЖЕНИЯ**

### **THE MODIFICATION OF "PAIR OF VALUES" METHOD FOR ATTACKS ON THE BASIS OF KNOWN STEGO**

*В статье предлагается модификация метода PoVs, позволяющая использовать его для атаки на основании априорно известных параметров стегановложения, а именно, частот появления нуля и единицы.*

*The article proposes a modification of the method PoVs, which allows to use it to attack on the basis of a priori known parameters of stego such as percentage of zero and one.*

#### **Введение**

В настоящее время в защите информации от несанкционированного доступа все большую популярность наряду со средствами шифрования приобретают и стеганографические методы защиты информации [1]. Их отличительной особенностью является то, что они позволяют скрывать сам факт наличия секретной информации. Наиболее широко подобные методы применяются при необходимости передачи конфиденциальных сообщений по открытым каналам связи, при этом параллельно открытому каналу создается как бы второй, невидимый для противника, секретный канал передачи данных. Достигается это путем внедрения конфиденциальной информации в открытые сообщения (контейнеры). При этом само внедрение осуществляется так, чтобы не нарушались функциональность и целостность контейнеров.

Понятие цифровой стеганографии связано с использованием в качестве контейнеров цифровых носителей информации [1, 2]. Наиболее популярными среди них являются текстовые, графические, аудио- и видеофайлы различных форматов, модули исполнимых программ, пакеты данных, передаваемые по различным сетевым каналам. В общем случае, в качестве носителя может использоваться практически любой цифровой сигнал. Вопрос заключается лишь в том, каков объем той информации, которую мы

сможем внедрить в выбранный носитель, и какова степень скрытности этого внедрения. При этом необходимо учитывать то, что противник может обладать достаточными ресурсами для проведения стеганоанализа сообщений, т.е. способен проводить сложный анализ всех перехватываемых сообщений с целью выявления скрытого канала передачи данных. С этой точки зрения предпочтение следует отдать тем контейнерам, которые имеют аналоговую природу происхождения. Связано это прежде всего с тем, что подобные носители обладают относительно большой избыточностью, мало чувствительны к незначительным искажениям и стеганостойкость (способность противостоять стеганоанализу) большинства методов сокрытия информации в подобных контейнерах также достаточно высока.

На сегодняшний день наиболее популярными методами сокрытия информации в изображениях являются методы семейства LSB (Least Significant Bits). Метод LSB-replacement, или метод замены младших бит, был предложен Е. Адельсоном в 1990 г. [3]. Идея метода заключается в замене младших бит в байтах цветового представления точек исходного изображения битами скрываемого сообщения. Возможность такой замены обусловлена некоторой избыточностью представления цвета и, как отмечается, возможно, случайным поведением младших бит.

Также существует модификация метода замены младших бит, которую называют  $\pm 1$  встраиванием, или выравниванием младших бит (LSB-matching). Этот алгоритм случайно модулирует значения элементов контейнера (пикселей) с помощью операции  $\pm 1$  так, что их младшие биты приводятся в соответствие с битами сообщения. Несмотря на то что такой алгоритм достаточно схож с обычной заменой младших бит, его оказывается труднее обнаружить. Но метод  $\pm 1$  имеет недостаток, который заключается в независимости вносимого шума. Совсем недавно группой ученых был разработан метод HUGO, имеющий в основе скорректированную схему  $\pm 1$  встраивания. Метод HUGO строит различные высокоразмерные модели зависимостей в контейнерах и определяет области, в которые можно вносить изменения, минимизируя возможные искажения. Алгоритм использует алгебраические методы выделения используемых областей, тесно связанные с методами построения корректирующих кодов [4].

Отметим, что большинство стеганографических продуктов сегмента free- и shareware реализуют именно LSB-replacement, что определяет актуальность разработки точных методов его анализа для практического применения в рамках компьютерно-технической экспертизы.

### **Идея метода PoVs**

Рассмотрим PoVs-метод стеганоанализа на основе анализа статистики «пар значений» (pairs of values). Данный метод, как показано в [5], может быть эффективно использован для стеганоанализа наиболее распространенного метода встраивания в «наименьший значащий бит» (LSB), когда младший бит цветового компонента каждого пиксела контейнера-изображения заменяется битом скрываемого сообщения. Метод основан на поиске закономерности в вероятностях появления значений яркости в естественных изображениях и изображениях со встроенным ЦВЗ. При замене младшего бита цветового компонента очередного пиксела изображения на очередной бит предварительно зашифрованного или сжатого ЦВЗ значение яркости пиксела модифицированного изображения либо равно значению яркости пиксела контейнера, либо изменяется на единицу с вероятностью  $\sim 1/2$ .

Для поиска следов встраивания был предложен метод анализа закономерностей в частотах появления «соседних» значений яркости. Такие пары значений (pair of values) различаются только значением наименее значащего бита (НЗБ).

Пусть  $h_c = \{C_i\}$ ,  $h_s = \{S_i\}$  — гистограммы одного из цветовых каналов в цветовой модели RGB, 24 бит/пиксел, пустого и заполненного канала, соответственно:

$$h_c(n) = |\{(i, j) | c(i, j) = n\}|, \quad h_s(n) = |\{(i, j) | s(i, j) = n\}|,$$

где  $c(i, j), s(i, j)$  — значения пикселей с координатами  $(i, j)$ . Цветовая гамма изображений содержит 256 оттенков,  $0 \leq i \leq 127$ . Тогда верно:

$$S_{2i} = C_{2i} + p^0 \cdot C_{2i+1} - p^1 \cdot C_{2i} = C_{2i}(1 - p^1) + p^0 \cdot C_{2i+1} = p^0(C_{2i} + C_{2i+1}), \quad (1)$$

$$S_{2i+1} = C_{2i+1} + p^1 \cdot C_{2i} - p^0 \cdot C_{2i+1} = C_{2i+1}(1 - p^0) + p^1 \cdot C_{2i} = p^1(C_{2i} + C_{2i+1}), \quad (2)$$

где  $p^0, p^1$  — частоты появления, соответственно, ноля и единицы во встраиваемой битовой строке. Заметим, что при  $p^0 = p^1$  верно  $S_{2i} = S_{2i+1}$ .

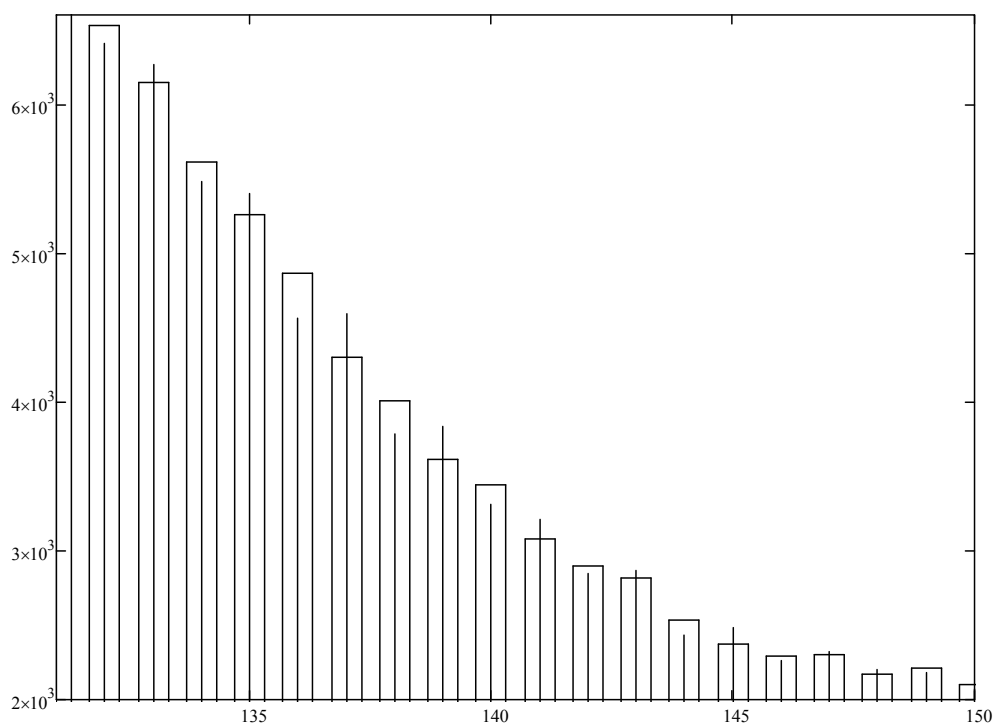


Рис. 1. Участок гистограмм S (линии) и C (прямоугольники)

Следовательно, при встраивании сообщения в НЗБ цветового компонента пикселей необходимо исследовать статистические характеристики в 128 парах номеров цвета. На рис. 1 наблюдается изменение гистограммы после вложения методом LSB-replacement. На диаграмме хорошо видно, что частоты появления четных и нечетных номеров цвета в естественных контейнерах существенно различаются между собой во многих парах, а в заполненном контейнере различие между этими частотами уменьшается. Это является явным признаком наличия скрываемой информации. Заметим, что среднее значение частоты появления для каждой пары в заполненном контейнере не изменилось по сравнению с исходным контейнером.

### Математическая модель PoVs

Рассмотрим рисунок в градациях серого 8 бит/пиксел, гистограмма рисунка содержит 256 столбцов. Пусть  $\tilde{n}_i = \frac{(h_{2i} + h_{2i+1})}{2}$ ,  $n_i = \frac{h_{2i}}{2}$  (или  $n_i = \frac{h_{2i+1}}{2}$ ),  $0 \leq i \leq 127$ , тогда согласно [5] справедлива гипотеза о том, что для каждой пары столбцов  $(2i, 2i + 1)$  для рисунка с максимальным вложением и одинаковой частотой появления ноля и единицы в стегановложении должно выполняться  $\tilde{n}_i \approx n_i$ . Таким образом, задача обнаружения вложения сводится к задаче проверки гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения. Для этого используется критерий Пирсона, или как его еще называют — критерий  $\chi^2$ , где в качестве теоретических частот берутся значения  $\tilde{n}_i$ , в качестве наблюдаемых —  $n_i$ . Величина  $\chi_{k-1}^2$  оценивает разницу между двумя распределениями по  $k-1$  числу степеней свободы:

$$\chi_{k-1}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - \tilde{n}_i)^2}{\tilde{n}_i}. \quad (3)$$

Сравнение двух распределений осуществляют согласно следующей формуле:

$$p = 1 - \frac{\chi_{k-1}^2}{2^{\frac{k-1}{2}} G(\frac{k-1}{2})} \int_0^{\frac{\chi_{k-1}^2}{2}} e^{-x} x^{\frac{k-1}{2}-1} dx, \quad (4)$$

где  $G$  — гамма-функция Эйлера. Чем больше значение  $p$ , тем больше объем вложения.

Следует заметить, что теорема Пирсона утверждает несколько другое, а именно: критерий  $\chi^2$  проверяет согласованность эксперимента и полностью определенного гипотетического распределения, однако, несмотря на теоретическую необоснованность возможности применения, метод PoVs показывает хорошие результаты на качественном уровне. Количественная оценка возможна с большой погрешностью, т.к. шкалы соответствия размера стегановложения полученному  $\chi^2$  не приводятся.

### Применение метода PoVs для атаки на основании известного стегановложения

Отметим, что при применении вышеописанного критерия исходят из предположения о равномерном распределении нолей и единиц во встраиваемом сообщении. Вместе с тем есть класс атак, основанных на известном стегановложении [2]. Атака имеет целью установить наличие стеганографического канала и может быть использована в практике следственных органов для определения субъективной стороны преступления. В этом случае, стеганоаналитику известны статистические характеристики стегановложения и он может скорректировать статистические методы в лучшую сторону. Таким образом, существует задача адаптации рассмотренного статистического метода к атаке на основании известного стегановложения.

Изменим исходную гипотезу с учетом априорной известности частоты появления ноля и единицы в стегановложении, сместив теоретические распределения пропорционально. Получим два теоретических и два наблюдаемых распределения для четных и нечетных столбцов гистограммы, соответственно:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_i^0 &= p^0 \cdot (h_{2i} + h_{2i+1}), & n_i^0 &= h_{2i}, \\ \tilde{n}_i^1 &= p^1 \cdot (h_{2i} + h_{2i+1}), & n_i^1 &= h_{2i+1}, \end{aligned}$$

а в качестве результирующего значения  $\chi^2$  возьмет их среднее.

Предложенная модель вкупе с процедурой LSB-replacement была реализована в среде Mathcad 15.0. Вложение производилось случайным образом, в качестве варьируемых параметров выступали имя файла, вероятность ноля и размер вложения. Анализ массива контейнеров, заполненных различными стеганографическими программами, показал, что частота появления ноля (единицы) находится в пределах (0.46; 0.54), что определило область моделирования [0.5; 0.55].

В качестве экспериментальной базы случайным образом было выбрано 40 изображений с фотохостинга fvl.ru, для подготовки стеганоконтейнеров все файлы были преобразованы в формат BMP (24-bit) с разрешением 800×600 пикселей, в каждое изображение пятикратно осуществлялось вложение — 10, 30, 50, 70 и 90% от ёмкости.

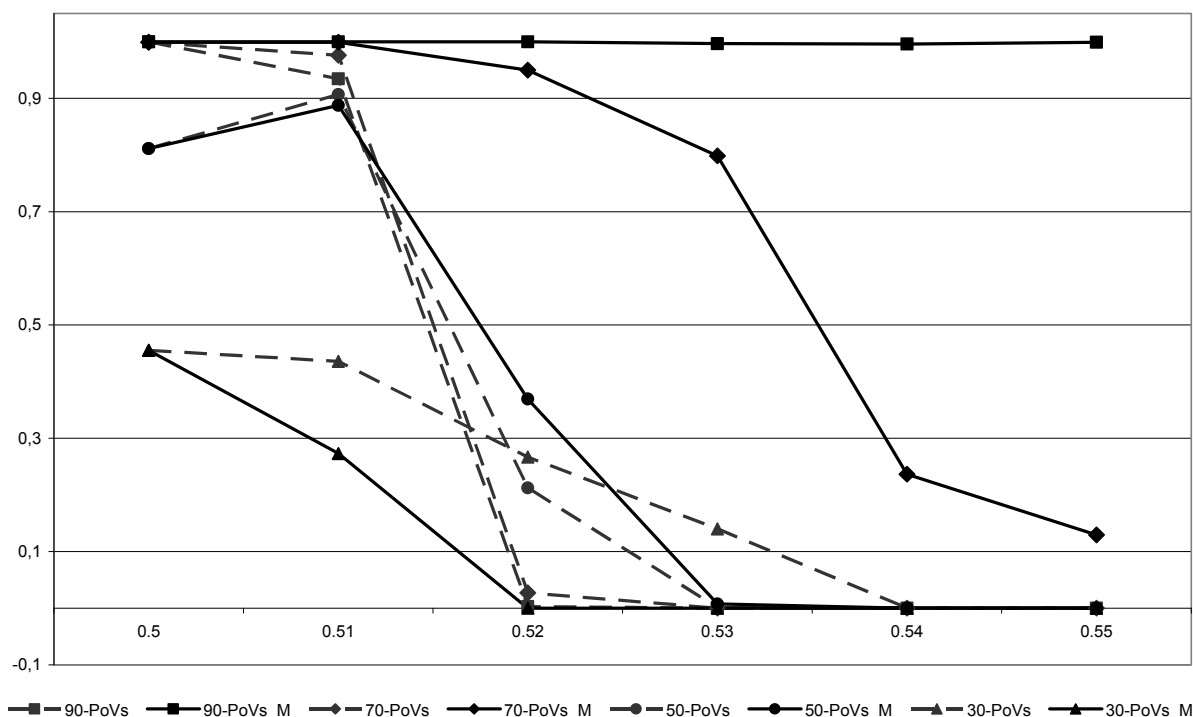


Рис. 2. Усредненные результаты атаки методом PoVs и PoVs с априорно известным стегановложением (PoVs\_M)

Усредненные результаты моделирования и среднеквадратичное отклонение представлены на рис. 2, 3, соответственно. По оси абсцисс отложена частота появления ноля (единицы), по оси ординат — вероятность наличия вложения, штриховая линия — расчет методом PoVs, сплошная линия — PoVs с априорно известным стегановложением (PoVs\_M).

Из графиков видно, что при уровне вложения менее 50% преобладающее значение имеет начальное распределение в плоскости НЗБ, которое значительно изменяется от изображения к изображению и, следовательно, достоверность результатов атаки методом PoVs невелика.

На уровне вложения 70% и более метод PoVs показывает адекватные результаты при отклонении вероятности появления ноля (единицы) во вложении  $0.5 \pm 0.01$ , при этом среднеквадратичное отклонение не более 0.1, что приводит к незначительной погрешности оценки размера вложения. При аналогичных размерах вложения метод PoVs

с априорно известным стегановложением показывает более стабильные результаты. При вложении 70% он адекватно работает при отклонении частоты появления ноля (единицы) во вложении  $0.5 \pm 0.03$ , в случае 90% и более частота появления ноля (единицы) во вложении может находиться в пределах  $0.5 \pm 0.1$ .

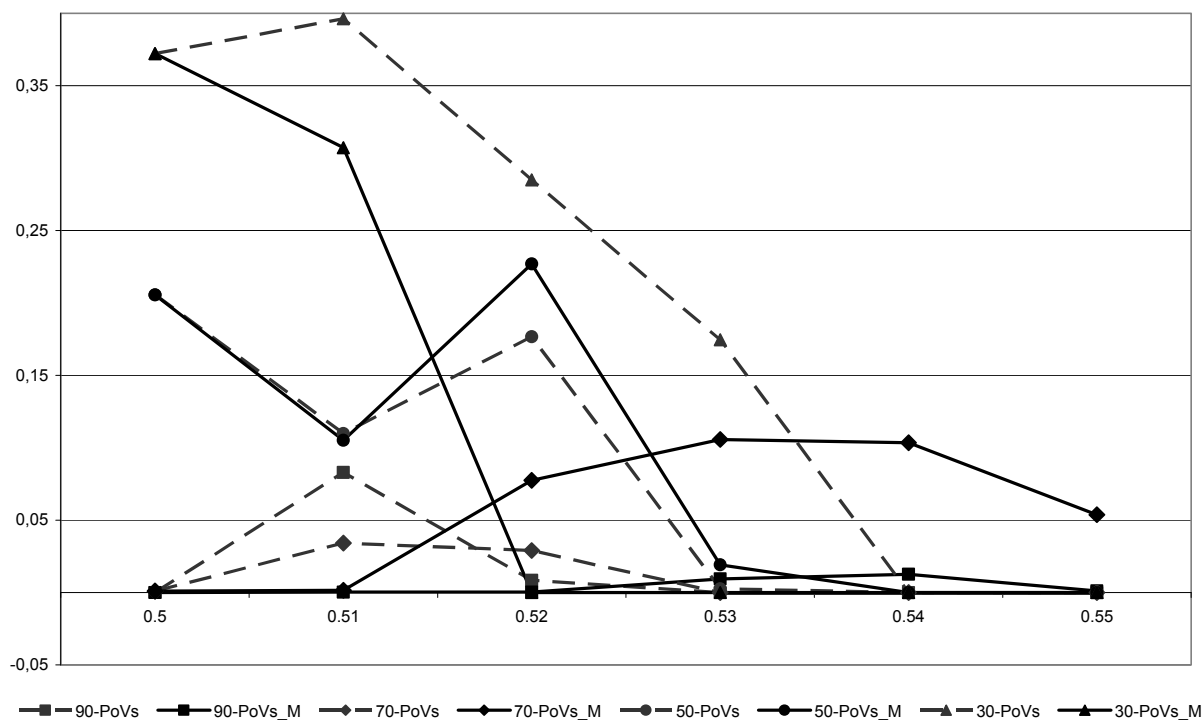


Рис. 3. Среднеквадратичное отклонение результатов атаки методом PoVs и PoVs с априорно известным стегановложением (PoVs\_M)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ / А.В. Аграновский [и др.]. — М.: Вузовская книга, 2009. — 220 с.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. — К.: МК-Пресс, 2006. — 288 с.
3. E. Adelson: Digital Signal Encoding and Decoding Apparatus. — U.S. Patent. — No. 4939515, 1990.
4. Мерзлякова Е.Ю. Построение стеганографических систем для растровых изображений, базирующихся на теоретико-информационных принципах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / ФГОБУ ВПО «СибГУТИ». — Новосибирск, 2011. — 16 с.
5. Westfeld A. Attacks on Steganographic Systems: Breaking the Steganographic Utilities EzStego, Jsteg, Steganos and S-Tools-and Some Lessons Learned / A. Westfeld, A. Pfitzmann // 3rd International Workshop on Information Hiding (2000).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Солодуха Роман Александрович. Доцент кафедры автоматизированных информационных систем ОВД. Кандидат технических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: aisovd@vimvd.ru

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473)2476-477.

Атласов Игорь Викторович. Начальник кафедры автоматизированных информационных систем ОВД. Доктор физико-математических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: aisovd@vimvd.ru

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473)2476-477.

Solodukha Roman Alexandrovich. Assistant professor of the Automated Information Systems of Law Enforcement Bodies chair. Candidate of sciences (technical), assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)2476-477.

Atlasov Igor Victorovich. Chief of the Automated Information Systems of Law Enforcement Bodies chair. Doctor of sciences (physics and mathematics), professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)2476-477.

**Ключевые слова:** стеганоанализ; метод наименьших значащих бит; атака на основании известного стегановложения; метод пар значений; bmp-файл.

**Key words:** steganalysis; least significant bits method (LSB); the attack on the basis of well-known secret message; pair of values (PoVs)-method; bmp-file.

УДК 519.68

## ИЗДАНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО ИНСТИТУТА МВД РОССИИ



Сети и системы радиосвязи ОВД и средства их информационной защиты: учебное пособие / О.И. Бокова [и др.]; под ред. Н.С. Хохлова. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012.— 228 с: ил.

Пособие содержит основные теоретические сведения о современных сетях и системах радиосвязи, используемых органами внутренних дел, практические рекомендации и примеры. Предназначено для курсантов и слушателей радиотехнического факультета.





**А.Б. Сизоненко,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Краснодарский университет МВД России

## **АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТРИЦЫ ДОСТУПА В ДИСКРЕЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА**

### **ARITHMETIC-LOGICAL REPRESENTATION OF THE ACCESS MATRIX IN A DISCRETIONARY ACCESS CONTROL MODEL**

*Рассмотрена дискреционная модель разграничения доступа. Проанализированы способы представления логических функций арифметическими полиномами и алгоритмы их получения. Предложено использовать арифметические способы представления булевых функций для реализации матрицы доступа. Для оптимального представления матрицы доступа применен алгоритм минимизации количества членов модулярного арифметического полинома, описывающего систему не полностью определенных булевых функций.*

*Discretionary access control model is considered. Methods for representing logic functions by arithmetic polynomials and algorithms of their receipt are analyzed. Arithmetic methods of representations of Boolean functions is proposed to use for the implementation of access matrix. Algorithm for minimizing the number of members of the modular arithmetic polynomial that describes the system is not completely defined Boolean functions is applied to optimal representation of the access matrix.*

#### **Введение**

Матрицы доступа содержат набор прав доступа субъектов к объектам и являются основным элементом дискреционной модели разграничения доступа. Руководящие документы требуют осуществлять контроль доступа субъектов к защищаемым ресурсам в соответствии с матрицей доступа в автоматизированных системах с классами защиты 1А, 1Б, 1В, 1Г [5], а для средств вычислительной техники дискреционная модель разграничения доступа применяется с шестого по первый класс защищенности [6]. Матрицу доступа можно свести к таблице истинности и представить системой логических функций. В научной литературе описаны способы реализации логических функций арифметическими полиномами (АП) [2, 4]. Такое представление при программной реализации отличается от традиционной большей гибкостью, производительностью и, в некоторых случаях, более компактным представлением [2, 4]. Целью данной работы является достижение более компактного представления матрицы доступа по

сравнению с традиционным табличным представлением путем ее реализации арифметическими полиномами.

### 1. Описание дискреционной модели разграничения доступа

Рассмотрение проведем на примере модели безопасности Харрисона — Руззо — Ульмана [1], являющейся классической дискреционной моделью, которая реализует произвольное управление доступом субъектов к объектам и контроль за распространением прав доступа.

Формальное описание модели состоит из следующих элементов [1]:

1. Конечное множество прав доступа  $R = \{r_0, \dots, r_{d-1}\}$ .  
 2. Конечные множества исходных субъектов  $S = \{s_0, \dots, s_{k-1}\}$  и объектов  $O = \{o_0, \dots, o_{m-1}\}$ . Для того чтобы включить в область действия модели и отношения между субъектами, принято считать, что все субъекты одновременно являются и объектами —  $S \subset O$ .

3. Исходная матрица доступа  $\mathbf{M}[s, o]$ , каждая ячейка которой содержит права доступа субъектов к объектам, принадлежащих множеству прав доступа  $\mathbf{R}$ .

4. Конечный набор команд  $C = \{\alpha(x_1, \dots, x_k)\}$ , каждая из которых состоит из условий выполнения и интерпретации в терминах перечисленных элементарных операций.

Операция *enter* вводит право  $r$  в существующую ячейку матрицы доступа. Содержимое каждой ячейки рассматривается как множество, т.е. если это право уже имеется, то ячейка не изменяется.

Действие операции *delete* противоположно действию операции *enter*. Она удаляет право из ячейки матрицы доступа, если оно там присутствует. Поскольку содержимое каждой ячейки рассматривается как множество, *delete* не делает ничего, если удаляемое право отсутствует в указанной ячейке.

Операции *create subject* и *destroy subject* соответственно создают или удаляют субъект, а операции *create object* и *destroy object* соответственно создают или удаляют объект.

Поведение системы моделируется с помощью понятия состояния. Пространство состояний системы образуется декартовым произведением множеств составляющих ее объектов, субъектов и прав —  $O \times S \times R$ . Текущее состояние системы  $Q$  в этом пространстве определяется тройкой, состоящей из множества субъектов, множества объектов и матрицы прав доступа  $\mathbf{M}$ , описывающей текущие права доступа субъектов к объектам, —  $Q = (S, O, M)$ .

### 2. Представление систем булевых функций арифметическими полиномами

Произвольный кортеж булевых функций  $f_d(X) * f_{d-1}(X) * \dots * f_1(X)$  может быть единственным образом представлен АП [2]:

$$Y = D(X) = \sum_{i=0}^{2^n-1} c_i x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n},$$

где  $\mathbf{C} = (c_0 \dots c_{2^n-1})$  — целочисленный вектор коэффициентов АП;

$i = (i_{n-1} i_{n-2} \dots i_0) = \sum_{u=0}^{n-1} i_u 2^u$ ,  $i_u \in \{0, 1\}$  — разряды двоичной системы счисления.

$$x_p^{i_p} = \begin{cases} 1, & \text{при } i_p = 0, \\ x_p, & \text{при } i_p = 1. \end{cases}$$

АП, описывающий систему логических функций, можно получить алгебраическим и матричным способами [2, 4], а также способом последовательной поляризации [8].

Алгебраический способ заключается в реализации следующего алгоритма.

Алгоритм 1.

Шаг 1. Получение арифметических полиномов  $P_i(X)$  для каждой булевой функции  $y_j = f_j(X)$ ,  $j = 1, \dots, d$ , по формулам замены логических операций на арифметические:

$$x \oplus y = x + y - 2xy;$$

$$x \vee y = x + y - xy;$$

$$x \wedge y = xy;$$

$$\bar{x} = 1 - x.$$

Шаг 2. Получение арифметических полиномов, взвешенных весами  $2^{j-1}$  ( $j = 1, \dots, d$ ).

Шаг 3. Получение искомого арифметического полинома  $D(X)$  путем суммирования арифметических полиномов, полученных в шаге 2 и приведения подобных слагаемых.

Матричное преобразование выполняется следующим образом:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}_{2^n} \cdot \mathbf{Y}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Y}$  — вектор истинности БФ;  $\mathbf{A}_{2^n}$  — матрица прямого арифметического преобразования

размерности  $2^n \times 2^n$ ; Матрица  $\mathbf{A}_{2^n} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{2^{n-1}} & 0 \\ -\mathbf{A}_{2^{n-1}} & \mathbf{A}_{2^{n-1}} \end{bmatrix}$  называется  $n$ -й кронекеровской

степенью  $\mathbf{A}_{2^n} = \bigotimes_{j=1}^n \mathbf{A}_1$  базовой матрицы  $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ .

Матричные преобразования хорошо алгоритмируются и удобны для практического применения. Однако алгебраический способ недостаточно формализован, что затрудняет его эффективную реализацию средствами вычислительной техники. Для выполнения матричных преобразований необходимо  $N_M = 3^n - 2^n$  операций [9].

В [8] представлен алгоритм получения коэффициентов арифметического полинома методом последовательной поляризации, позволяющий уменьшить количество операций до  $N_{II} = n2^{n-1}$ .

Поляризация арифметического полинома по переменной  $x_p$  будет заключаться в замене всех вхождений инверсной переменной  $\bar{x}_p$  на  $1 - x_p$ :

$$\bar{x}_p \rightarrow 1 - x_p.$$

Можно формализовать процесс поляризации, перейдя к выполнению действий только над коэффициентами, с помощью алгоритма, представленного ниже [8].

Алгоритм 2.

1. Выделение в векторе коэффициентов тех коэффициентов, которым соответствуют термы с инверсной переменной. Выделение осуществляется выполнением операции умножения вектора коэффициентов на инвертированный и транспонированный вектор-столбец из таблицы истинности, соответствующим переменной, по которой происходит поляризация.

2. Умножение полученного в шаге 1 вектора на  $-1$ .

3. Сдвиг вектора на  $2^p$  разрядов вправо.

4. Сложение вектора с исходным вектором коэффициентов (что соответствует приведению подобных слагаемых в алгебраическом способе представления).

Если  $m < Y_{\max}$ , где  $Y_{\max}$  — максимальное значение, принимаемое  $Y$ , то произвольный кортеж логических функций может быть представлен модулярным арифметическим полиномом [4]:

$$Y = MD(X) = \left| \sum_{i=0}^{2^n-1} \psi_i(x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n}) \right|_m^+$$

где  $\psi_i = |c_i|_m^+$ . Коэффициенты модулярного АП  $MD(X)$  лежат в области целых неотрицательных чисел, а их числовой диапазон равен значению модуля  $m$  [4].

### 3. Реализация матрицы доступа арифметическими полиномами

Разобьем матрицу доступа на столбцы, соответствующие отдельным объектам, и представим его в виде таблицы истинности (табл. 1).

Таблица 1

Представление матрицы доступа таблицей истинности

S	Номер набора	Переменные (X)				Права доступа (R)				Y
		$x_{n-1}$	...	$x_1$	$x_0$	$r_{d-1}$	...	$r_1$	$r_0$	
$s_0$	0	0	...	0	0	$r_{d-1}(X_0)$	...	$r_1(X_1)$	$r_0(X_1)$	$Y_0$
$s_1$	1	0	...	0	1	$r_{d-1}(X_1)$	...	$r_1(X_2)$	$r_0(X_2)$	$Y_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$s_k$	$k-1$	x	...	x	x	$r_{d-1}(X_{k-1})$	...	$r_1(X_{k-1})$	$r_0(X_{k-1})$	$Y_{k-1}$
	$k$	x	...	x	x	—	...	—	—	—
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$2^n - 2$	1	...	1	0	—	...	—	—	—
	$2^n - 1$	1	...	1	1	—	...	—	—	—

Количество переменных возьмем равным:

$$n = \lceil \log_2 k \rceil, \tag{2}$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  обозначает округление до ближайшего большего целого числа.

В таблице истинности первые  $k$  значений будут определены, а на последних  $2^n - k$  наборах функция будет не определена. Количество функций будет соответствовать количеству возможных прав доступа субъекта к объекту. Логическая «1» обозначает наличие права, логический «0» — отсутствие. Вектор  $Y$  является целочисленным, значения которого вычисляются следующим образом:

$$Y = r_{d-1}2^{d-1} + \dots + r_12^1 + r_0.$$

Для получения вектора коэффициентов можно применить прямое матричное преобразование (1) либо алгоритм последовательной поляризации (алгоритм 2).

Используя алгоритм, изложенный в [3, 7], можно оптимизировать количество членов арифметического полинома путем доопределения частично заданной системы булевых функций на тех наборах, на которых значение функции не задано.

Алгоритм 3.

Шаг 1. Построим образующую матрицу прямого матричного преобразования, соответствующую количеству переменных.

Шаг 2. Из матрицы уберем столбцы, соответствующие наборам, на которых система булевых функций не определена. Уберем неопределенные наборы и из вектора истинности  $Y$ . Перемножим полученные образующую матрицу и вектор истинности. Получим вектор-столбец.

Шаг 3. Составим образующую матрицу из вектора-столбца, полученного в шаге 2 в левой части, и удаленных столбцов образующей матрицы.

Выберем строки, которые могут при подборе значения первого неопределенного значения гарантированно (вне зависимости от значений остальных неопределенных значений) обратить один или несколько коэффициентов  $\psi$  в 0.

Повторим шаги 2—4 алгоритма, пока не будут доопределены значения функции на всех наборах.

Разберем пример. Пусть дано множество субъектов  $S = \{s_0, \dots, s_9\}$ , таким образом,  $k = 10$ . Множество прав доступа включает право на чтение ( $rd$ ), запись ( $wr$ ), выполнение ( $ex$ ), следовательно,  $d = 3$ . Права доступа субъектов к объекту заданы.

Построим таблицу истинности. Вычислим количество переменных по формуле (2):  $n = \lceil \log_2 10 \rceil = 4$ . Система булевых функций будет задана на 10 наборах и на 6 будет не определена (табл. 2).

Таблица 2

Пример матрицы доступа

S	Номер набора	Переменные (X)				Права доступа (R)			Y
		$x_3$	$x_2$	$x_1$	$x_0$	$r_2$ (ex)	$r_1$ (wr)	$r_0$ (rd)	
$s_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_1$	1	0	0	0	1	0	1	1	3
$s_2$	2	0	0	1	0	0	0	0	0
$s_3$	3	0	0	1	1	1	0	1	5
$s_4$	4	0	1	0	0	0	0	0	0
$s_5$	5	0	1	0	1	1	1	1	7
$s_6$	6	0	1	1	0	0	1	1	3
$s_7$	7	0	1	1	1	1	0	1	5
$s_8$	8	1	0	0	0	0	0	0	0
$s_9$	9	1	0	0	1	1	1	1	7
	10	1	0	1	0	—	—	—	—
	11	1	0	1	1	—	—	—	—
	12	1	1	0	0	—	—	—	—
	13	1	1	0	1	—	—	—	—
	14	1	1	1	0	—	—	—	—
	15	1	1	1	1	—	—	—	—

Вектор значений, вычисленный по алгоритму 3, будет следующий:

$$Y = [0 \ 3 \ 0 \ 5 \ 0 \ 7 \ 3 \ 5 \ 0 \ 7 \ 0 \ 1 \ 0 \ 3 \ 3 \ 1].$$

Используя алгоритм 2, получим вектор коэффициентов АП:

$$C = [0 \ 3 \ 0 \ 2 \ 0 \ 4 \ 3 \ 1 \ 0 \ 4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

$$\text{АП будет иметь вид: } Y = MD(X) = |3x_0 + 2x_1x_0 + 4x_2x_0 + 3x_2x_1 + x_2x_1x_0 + 4x_3x_0|_8^+.$$

Если к объекту обращается субъект  $s_3$ , то, вычислив значение полинома на третьем наборе переменных  $X = (0011)$ , получим  $Y = MD(X) = |3 + 2|_8^+ = 5_{10} = 101_2$ , что соответствует матрице доступа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Академия, 2005. — 144 с.
2. Малюгин В.Д. Параллельные логические вычисления посредством арифметических полиномов. — М.: Наука. Физматлит, 1997. — 192 с.
3. Сизоненко А.Б. Алгоритм построения модулярного арифметического полинома по частично заданной системе булевых функций / Современные направления теоретических и прикладных исследований 2011: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. 15—28.03.2011. Том 2. Технические науки. — Одесса: Черноморье, 2011. — С. 72—75.
4. Финько О.А. Модулярная арифметика параллельных логических вычислений: монография / под ред. В.Д. Малюгина. — М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Краснодар: КВИ, 2003. — 224 с.
5. Руководящий документ «Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации». Утвержден решением председателя ГТК при Президенте РФ от 30 марта 1992 г.
6. Руководящий документ «Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации». Утвержден решением председателя ГТК при Президенте РФ от 30 марта 1992 г.
7. Сизоненко А.Б. Реализация систем частичных булевых функций модулярными арифметическими полиномами // Вестник Воронежского института МВД России. — 2011. — №2. — С. 100—107.
8. Сизоненко А.Б. Получение арифметических полиномов методом последовательной поляризации // Системы управления и информационные технологии. — 2011. — №2.1(44). — С. 169—172.
9. Шалыто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. — СПб.: Наука, 2000. — 747 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Сизоненко Александр Борисович. Профессор кафедры оперативно-разыскной деятельности и специальной техники. Кандидат технических наук, доцент.

Краснодарский университет МВД России.

E-mail: Siz\_al@mail.ru

Россия, 350005, г. Краснодар, ул. Ярославская, 128. Тел. 8 (861) 2583671.

Sizonenko Alexander Borisovich. Professor of the chair of Operative-Search Activities and Special Equipment. Candidate of sciences (technical), assistant professor.

Krasnodar University of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 350005, Krasnodar, Yaroslavskaya Str., 128. Tel. 8(861)2583671.

**Ключевые слова:** дискреционная модель разграничения доступа; матрица доступа системы булевых функций; арифметические полиномы; не полностью заданные системы булевых функций.

**Key words:** discretionary access control model; access matrix; system of Boolean functions; arithmetic polynomials; systems of incompletely specified Boolean functions.

УДК 519.714



**С.А. Горбатенко,**  
*доктор технических наук, профессор*



**Н.В. Даценко,**  
*кандидат технических наук, доцент*

## **ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОНСУЛЬТАТИВНОЙ СИСТЕМЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ ТРАВМАТОЛОГИИ**

### **SEMANTIC INFORMATION LINGUISTIC TRANSLATION IN COMPUTER-BASED CONSULTATIVE SYSTEM OF FORENSIC MEDICAL TRAUMATOLOGY**

*Рассмотрены вопросы лингвистической трансляции семантической информации, содержащей описание результатов осмотра места происшествия, вещественных доказательств и симптомов на проблемно-ориентированном подмножестве естественного языка в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии, позволяющей на основе указанных данных оперативно формировать достоверные экспертные заключения по делам о расстройстве здоровья и смерти от воздействия внешних факторов.*

*The paper is dedicated to the questions of linguistic translation of semantic information that contain the description of accident location examination results, real evidence and symptoms in problem-oriented subset of natural language in computer-based consultative system of forensic medical traumatology that permit to form rapidly truthful expert conclusions for cases of health disorder because of external factors effect on the base of these data.*

#### **Введение**

К одной из основных задач судебно-медицинской травматологии (СМТ) относится установление взаимосвязи между наступившим расстройством здоровья и телесным повреждением, причиненным каким-либо фактором внешней среды (физическим, химическим, биологическим, психическим) [1]. Формирование судебно-медицинского диагноза осуществляется специалистом в условиях неполноты, неточности, противоречивости исходной информации, вследствие чего увеличивается вероятность совершения ошибок и снижается оперативность экспертизы [2].

Указанные проблемы экспертной практики могут быть решены путем использования современной вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения — автоматизированной консультативной системы (АКС), позволяющей уменьшить влияние субъективных факторов на процесс вывода заключения, увеличить скорость поиска и обработки данных и, тем самым, повысить достоверность получаемых решений и оперативность экспертизы [3].

При разработке АКС возникает задача организации процесса общения эксперта с системой на проблемно-ориентированном подмножестве естественного языка (ЕЯ), так как использование для этой цели регламентированных языков требует от пользователя специальных знаний о форматах данных, возможностях системы и т.д. Для обеспечения возможности автоматизированной обработки информации на естественном языке необходимо реализовать ее лингвистическую трансляцию на язык системы. Из-за сложного характера предметной области, в частности наличия многочисленных взаимосвязей между объектами и процессами, трансляция должна осуществляться с учетом семантических отношений между фрагментами запроса пользователя.

### **1. Постановка задачи и описание метода лингвистической трансляции семантической информации в автоматизированной консультативной системе**

Постановку задачи лингвистической трансляции семантической информации в АКС судебно-медицинской травматологии сформулируем следующим образом. Пусть заданы проблемно-ориентированное подмножество естественного языка, используемое экспертом при описании обстоятельств происшествия, и язык АКС, на котором описываются объекты и процессы предметной области (ПО), а также отношения между ними, другими словами, знания ПО. Требуется преобразовать некоторый семантический запрос  $t_k \in T$ ,  $k = \overline{1, K}$ , где  $T$  — множество всех запросов на проблемно-ориентированном ЕЯ, в формализованный запрос  $z_s \in Z$ ,  $s = \overline{1, S}$ , где  $Z$  — множество запросов на языке АКС.

Задача поиска наиболее достоверного диагноза на основе данных, введенных пользователем, решается с использованием процедурных знаний АКС, содержащих опыт формирования заключений в области судебно-медицинской травматологии. Для формализации процедурных знаний в системе используется продукционная модель, которая обеспечивает возможность модификации одних знаний независимо от других (например, в связи с непрерывным расширением номенклатуры химических веществ, развитием методов исследований и т.д.), а также позволяет сократить время поиска информации для повышения оперативности формирования экспертных заключений. Продукционные правила хранятся в базе знаний АКС в следующем виде [4]:

$$\langle \text{num}; L; \text{ЕСЛИ } A_1 \text{ и/или...} A_n, \text{ ТО } h_j; \text{МД}; \text{МНД} \rangle, \quad (1)$$

где num — имя продукции (в его качестве используется порядковый номер продукции в базе знаний);  $L$  — область применения продукции («химический фактор», «физический фактор» и т.д.);  $A_n \in A$ ,  $n = \overline{1, N}$  — посылки, описывающие некоторую ситуацию;  $h_j \in H$ ,  $j = \overline{1, J}$  — гипотеза, которая рассматривается в процессе вывода заключения, если посылки примут истинное значение; МД и МНД — соответственно мера доверия и мера недоверия гипотезы  $h_j$ ; для получения значений МД и МНД используется метод направленного опроса специалистов.

Например, из продукции «73; химический фактор; ЕСЛИ имеется запах миндаля, ТО отравление синильной кислотой; 0,9; 0,1» следует, что, по мнению специалистов, при наличии данного симптома мера доверия гипотезы «причиной отравления яв-



ляется синильная кислота», составляет величину, равную 0,9, а мера недоверия — величину, равную 0,1.

Таким образом, для решения задачи лингвистической трансляции необходимо осуществить преобразование исходного текста запроса  $t_k$  в формализованный запрос  $z_s$  на языке представления процедурных знаний (ЯППЗ) системы, что позволит выделить из  $z_s$  некоторое множество фактов  $F = \{f_b\}$ ,  $b = \overline{1, B}$ , сопоставить его с множеством  $A$  посылок продукционных правил и принять в качестве рабочих соответствующие гипотезы  $h_j \in H$ .

Задача лингвистической трансляции запроса  $t_k$  может быть эффективно решена с помощью метода контекстного фрагментирования, учитывающего не только синтаксическую характеристику предложения, но и семантические связи между его фрагментами [5,6]. Основу метода составляют лингвистическая модель, содержащая информацию о морфологии и синтаксисе проблемно-ориентированного подмножества ЕЯ, и базовые механизмы обработки предложений, реализующие следующие этапы:

1) грамматический анализ, задачей которого является построение синтаксической структуры предложения  $\pi_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $\pi_m \in t_k$ ;

2) семантическая интерпретация предложения  $\pi_m$ , т.е. формирование фрагментов на ЯППЗ автоматизированной консультативной системы, соответствующих описанию обстоятельств происшествия;

3) проблемный анализ, позволяющий структурировать множество фрагментов, полученных на предыдущем этапе, в соответствии с синтаксисом и семантикой ЯППЗ.

Лингвистическая модель, в свою очередь, состоит из трех компонентов: грамматической модели проблемно-ориентированного подмножества естественного языка (ГМ1), грамматической модели ЯППЗ автоматизированной консультативной системы (ГМ2), задающих словарь и грамматику соответствующих языков, и интерпретационной модели, на основе которой осуществляется отображение слов, словосочетаний и фрагментов подмножества ЕЯ в понятия, отношения и фрагменты ЯППЗ.

Грамматическая модель ГМ1 является объединением морфологической и синтаксической частей  $G = G_1 \cup G_2$ , которые представляют собой соответственно следующие фрагменты:

1) ориентированные графы

$$G_1 = \bigcup_{i=1}^I g_{1i}, g_{1i}(X_q, R_{1q}), q = \overline{1, Q}, \quad (2)$$

где  $X_q$  — множество элементов ГМ1, включающее слова (например, «травма», «кровозлияние», «глагол» и т.п.) и морфологические признаки (род, число, падеж и т.п.);  $R_{1q}$  — множество морфологических, родовидовых и структурных отношений (например, «имеет», «является» и т.п.);

2) грамматические контексты, которые задаются множеством графов:

$$G_2 = \bigcup_{j=1}^J g_{2j}, g_{2j}(X_q, R_{2q}), \quad (3)$$

где  $R_{2q}$  — множество синтаксических отношений (например, принадлежности, следования и т.п.).

Грамматическая модель ГМ2 задается аналогично ГМ1, причем вершинам и ребрам графов соответствуют понятия и отношения ЯППЗ автоматизированной консультативной системы судебно-медицинской травматологии.

Интерпретационную модель, позволяющую установить соответствие грамматических контекстов ГМ1 и ГМ2, представим с помощью системы продукций вида:

ЕСЛИ  $g_{2_j}$ , ТО  $\gamma_d$ , (4)

где  $g_{2_j}$  — грамматический контекст ГМ1;  $\gamma_d$  — грамматический контекст ГМ2, соответствующий  $g_{2_j}$ .

## 2. Грамматический анализ семантической информации в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии

Задачей грамматического анализа предложений  $\pi_m, \pi_m \in t_k, m = \overline{1, M}$ , является построение их синтаксической структуры на основе морфологической информации и синтаксических правил объединения слов. На первом этапе осуществляется распознавание слов  $y_u \in \pi_m, u = \overline{1, U}$  предложения и их поиск в тезаурусе системы, содержащем лексемы проблемно-ориентированного подмножества ЕЯ с указанием вида части речи, который приписывается каждому слову  $y_u \in \pi_m$ . Затем полученная цепочка слов представляется системой в виде графа  $\Gamma_m(y_u)$  путем сопоставления с грамматической моделью ГМ1, и производится фрагментирование  $\Gamma_m(y_u)$ , причем  $v$ -м фрагментом  $fr_m^v, v = \overline{1, V}$  графа  $\Gamma_m(y_u)$  называется его подграф  $\tau_m^v \in \Gamma_m(y_u)$ , изоморфный графу контекста  $g_{2_j} \in G_2$  [5]. Предложение  $\pi_m$  считается полностью фрагментированным, если каждое слово  $y_u \in \pi_m$  принадлежит, по крайней мере, одному фрагменту  $fr_m^v$ .

Например, пусть на вход автоматизированной консультативной системы поступило предложение  $\pi_m = \text{«ощущается запах миндаля»}$ . После приписывания информации из тезауруса о виде части речи  $y_u, u = \overline{1, 3}$ , осуществляется сопоставление с фрагментом ГМ1, приведенным на рис. 1.

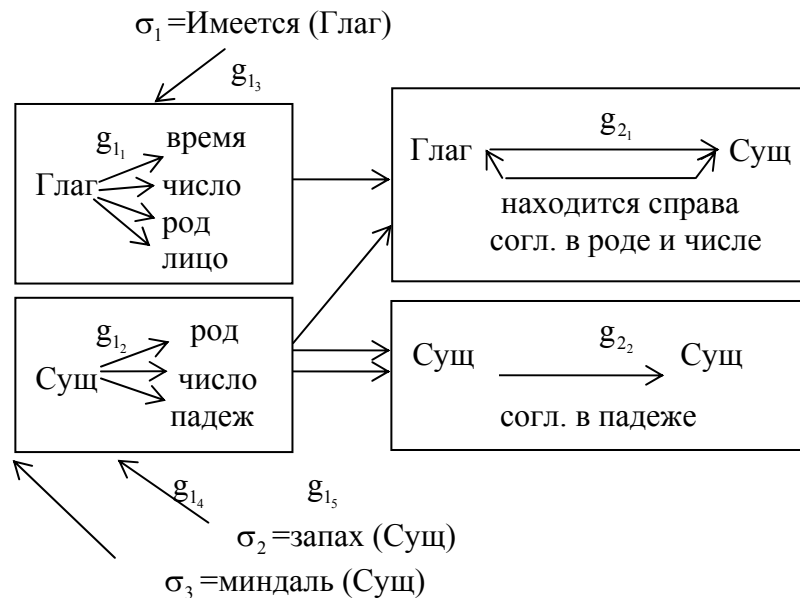


Рис. 1. Фрагмент грамматической модели проблемно-ориентированного подмножества естественного языка

На рис. 1 Глаг — глагол; Сущ — имя существительное;  $g_{1_1} \in G_1, g_{1_2} \in G_1$  — графы, задающие морфологические отношения типа «имеет» между понятиями ЕЯ;

$g_{1_3} \in G_1, g_{1_4} \in G_1, g_{1_5} \in G_1$  — графы, задающие родовидовые отношения типа «является»;  $g_{2_1} \in G_2, g_{2_2} \in G_2$  — грамматические контексты.

Результатом сопоставления является формирование системой графа  $\Gamma_m(y_u)$ , состоящего из двух фрагментов  $fr_m^1$  и  $fr_m^2$ , изоморфных графам контекстов  $g_{2_1}$  и  $g_{2_2}$  соответственно (рис. 2).

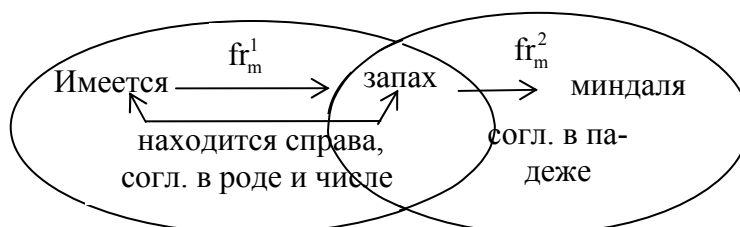


Рис. 2. Представление предложения на проблемно-ориентированном подмножестве ЕЯ в виде фрагментированного графа

### 3. Семантическая интерпретация и проблемный анализ фрагментированного запроса

Как указано выше, на этапе семантической интерпретации осуществляется формирование фрагментов на ЯППЗ, соответствующих фрагментам, полученным в результате грамматического анализа. В рассматриваемом примере выполняется отображение в соответствии со следующими продукциями интерпретационной модели:

ЕСЛИ  $g_{2_1}$ , ТО  $\gamma_1$ ; (5)

ЕСЛИ  $g_{2_2}$ , ТО  $\gamma_2$ ,

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — грамматические контексты ГМ2, показанные на рис. 3.

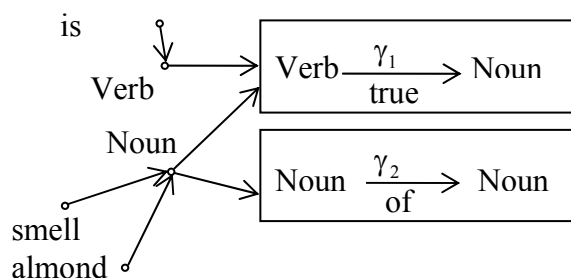


Рис. 3. Фрагмент грамматической модели языка представления процедурных знаний автоматизированной консультативной системы: Verb — глагол; Noun — имя существительное

Результат семантической интерпретации фрагментированного предложения  $\pi_m$  представлен на рис. 4.

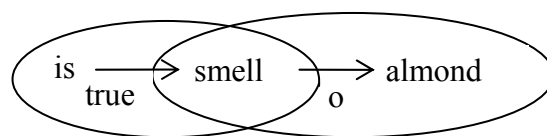


Рис. 4. Пример представления фрагментированного предложения на ЯППЗ в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии

Последним этапом лингвистической трансляции семантического запроса пользователя в АКС является проблемный анализ, позволяющий на основе фрагментов на ЯППЗ сформировать высказывания  $\pi_m^* \in z_s$ , удовлетворяющие синтаксису языка представления процедурных знаний и обладающие семантикой исходных предложений  $\pi_m \in t_k$ . Поскольку программная реализация АКС осуществлена в среде программирования Delphi, что обусловлено возможностью использования «стандартного» технического и программного обеспечения и требованиями сравнительно небольших объемов оперативной памяти и жесткого диска для функционирования системы, высказывания  $\pi_m^* \in z_s$  должны быть построены в соответствии с правилами языка Object Pascal. В связи с этим для рассматриваемого примера системой формируется следующее высказывание:  $\pi_m^* = \langle \langle \text{smell\_of\_almond} = \text{true} \rangle \rangle$ . Сопоставление  $\pi_m^*$  с множеством  $A$  посылок продукций приводит к рассмотрению в процессе вывода заключения следующего правила из базы знаний автоматизированной консультативной системы:

IF smell\_of\_almond=true THEN

Begin

Diagnosis='отравление синильной кислотой';

MD:=0.9;

MND:=0.1;

End.

Таким образом, на основании предложения  $\pi_m$ , введенного пользователем на проблемно-зависимом ЕЯ, система принимает в качестве рабочей гипотезу  $h_j = \langle \langle \text{отравление синильной кислотой} \rangle \rangle$ .

### Заключение

Предлагаемые процедуры обработки семантической информации в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии позволяют осуществить лингвистическую трансляцию запросов на проблемно-ориентированном естественном языке с учетом синтаксических и семантических отношений между фрагментами предложений и, тем самым, организовать общение с пользователями, не обладающими специальными знаниями о системе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Судебная медицина: Руководство для врачей / под ред. А.А. Матышева. — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Гиппократ, 1998. — 544 с.
2. Прасолов Б.Н., Даценко Н.В. Логический вывод в автоматизированной консультативной системе медико-криминалистической экспертизы отравлений // Информационные технологии. — № 6. — 2005. — С. 68—71.

3. Горбатенко С.А., Даценко Н.В. Формирование экспертных заключений в автоматизированной консультативной системе судебно-медицинской травматологии на основе неопределенной априорной информации // Современные информационные технологии и ИТ-образование: IV Международная научно-практическая конференция. — М.: МГУ, 2009. — URL: <http://2009.it-edu.ru/pages/Conference-works> (дата обращения: 03.07.2012).

4. Искусственный интеллект: в 3 кн. Кн. 2. Модели и методы / под ред. Д.А. Поспелова. — М.: Радио и связь, 1990. — 304 с.

5. Кузин Е.С., Ройтман А.И. Интеллектуализация ЭВМ. — М.: Высш. шк., 1989. — 159 с.

6. Горбатенко С.А., Даценко Н.В. Использование метода контекстного фрагментирования для анализа предложений ограниченного естественного языка в автоматизированной системе обучения гуманитарным дисциплинам // Охрана, безопасность и связь — 2009: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2009. — С. 28—32.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Горбатенко Светлана Александровна. Начальник кафедры радиоэлектронных устройств. Доктор технических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: [sv\\_gorbatenko@rambler.ru](mailto:sv_gorbatenko@rambler.ru)

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-32-57.

Даценко Наталия Валерьевна. Доцент кафедры вневедомственной охраны. Кандидат технических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: [natdatsenko@rambler.ru](mailto:natdatsenko@rambler.ru)

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-32-57.

Gorbatenko Svetlana Alexandrovna. Chief of Radio-Electronic Means chair. Doctor of sciences (technics), professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel.(473)262-32-57.

Datsenko Natalia Valerievna. Assistant professor of Non-department Guard chair. Candidate of sciences (technics), assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)262-32-57.

**Ключевые слова:** лингвистическая трансляция; лингвистическая модель; грамматический анализ семантической информации; семантическая интерпретация; проблемный анализ фрагментированного запроса.

**Key words:** linguistic translation; linguistic model; semantic information grammatical analysis; semantic interpretation; fragmented request problem analysis.

УДК 681.3, 343.9



**А.В. Мельников,**  
кандидат технических наук

## **МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ С РАЗДЕЛЯЮЩИМИСЯ ПРИЗНАКАМИ ERP-СИСТЕМ**

### **METHOD OF ANALYSIS OF HIERARCHIES WITH BEING DIVIDED SIGNS OF ERP-SYSTEMS**

*Обосновано разделение признаков объекта экспертизы на пять кластеров. Особое значение придано стоимостно-внедренческим характеристикам. Предложена блочно-диагональная форма матрицы парных сравнений. Разработанный алгоритм обеспечивает большую объективность экспертного оценивания, чем стандартный метод анализа иерархий.*

*Division of signs of object of examination into five кластеров is proved. Special value is given to cost-introduction characteristics. The block-diagonal form of a pair-comparison matrix is offered. The developed algorithm provides the greater objectivity of expert estimation, than a standard method of the analysis of hierarchies.*

Одним из основополагающих методов теории экспертных систем при решении многокритериальных задач является метод анализа иерархий, предложенный Т.Саати [1] и получивший современное развитие в 2008 г. [2]. Ключевым понятием этого метода является матрица парных сравнений признаков (частных критериев) объекта экспертизы. В упомянутой матрице определяется степень предпочтения некоторого признака, выбираемого в качестве основного, над остальными признаками, которые считаются менее важными.

Степень предпочтения определяется рангами признаков (критериев), которые определяются на основе предложенной Т. Саати лингвистической шкалы, содержащей девять градаций. Поскольку все признаки сравниваются с первым, главным, эти ранги могут принимать значения 1, 3, 5, 7, 9, т.е. имеют «обратную» зависимость — чем меньше важность признака, тем больше его ранг. Для построенной матрицы парных сравнений определяются собственные значения и собственные векторы, первый из которых дает вектор приоритетов признаков (критериев), используемый после нормировки в качестве вектора весовых коэффициентов в линейной комбинации признаков показателя качества объекта экспертизы.

Метод анализа иерархий получил широкую признательность ученых благодаря своей универсальности и изяществу используемого математического подхода. Однако сам Т. Саати [1, 2] и его последователи [3, 4] отмечали серьезную ограниченность метода. Дело состоит в том, что эксперты с психологической точки зрения способны эффективно различать не более 5-6 признаков. Подобную ситуацию можно назвать «психологическим эффектом большой размерности». Реальные объекты экспертизы могут содержать 15-20 признаков, и попытка их сравнительной оценки приводит к потере объективности экспертизы. С вычислительной точки зрения составление матрицы парных сравнений столь большой размерности приводит к проблеме обеспечения ее согласованности, а в результате — к значительным вычислительным погрешностям.

Другой причиной погрешности экспертизы является расплывчатость суждений 9-уровневой лингвистической шкалы. При использовании больших рангов предпочтений (7—9) рассчитываемые оценки весовых коэффициентов для менее значимых признаков оказываются непомерно заниженными. Например, если главному признаку соответствует весовой коэффициент 1,0, то для некоторых менее важных признаков могут получиться значения 0,05—0,1. Это противоречит другому способу нахождения относительного уровня весовых коэффициентов — методу прямого ранжирования, при котором эксперты определяют относительную важность признаков без построения матрицы парных сравнений.

Целью данной работы является разработка модификации метода анализа иерархий с целью преодоления упомянутых выше вычислительных проблем и повышения объективности экспертизы. Назовем в дальнейшем эту модификацию методом анализа иерархий с разделяющимися признаками (МАИ РП).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: обосновать кластеризацию признаков объекта экспертизы; ввести комплексный показатель качество-цена как функционал разделенных признаков; ввести блочно-диагональную матрицу парных сравнений и исследовать алгоритм нахождения блочно-диагональной матрицы собственных векторов; применить разработанный метод к сравнительной оценке ERP-систем.

**Кластеризация признаков объекта экспертизы.** Предложим разделение множества признаков  $\{x_i\}$  на подмножества

$$\{x_i\} = \{ \{x_{i,кол}\} \cup \{x_{j,нал}\} \cup \{x_{r,пэф}\} \cup \{x_{l,пфп}\} \cup \{x_{k,отр}\} \}, \quad (1)$$

где  $\{x_{i,кол}\}$  — подмножество  $m_1$  количественных признаков;  $\{x_{j,нал}\}$  — подмножество  $m_2$  «признаков наличия»;  $\{x_{r,пэф}\}$  — подмножество  $m_3$  «признаков положительного эффекта»;  $\{x_{l,пфп}\}$  — подмножество  $m_4$  «признаков психофизиологической природы»;  $\{x_{k,отр}\}$  — подмножество  $m_6$  признаков «отрицательного эффекта».

Охарактеризуем эти подмножества последовательно.

Подмножество *количественных признаков*  $\{x_{i,кол}\}$  содержит числовые данные из прайс-листов или технических характеристик (в технике — дальность связи, помехоустойчивость и т.д.; в экономике — платежеспособность, ликвидность, рентабельность и т.д.).

Подмножество признаков наличия  $\{x_{j,нал}\}$  содержит признаки, которые характеризуют наличие или отсутствие некоторого свойства у объекта экспертизы. Например, в технике — наличие встроенной видеокамеры или радиоприемника у сотового телефона, наличие сенсорного экрана. В экономических программах — наличие подпрограмм анализа конкретных хозяйственных процессов.

Обычно при решении задач экспертизы выбираются качественные признаки, увеличение числовых оценок которых ведет к росту комплексного показателя качества  $J$ . Такие признаки составляют подмножество признаков положительного эффекта  $\{x_{r,пэф}\}$ . Например, удобство пользования, страна, фирма-изготовитель, внешний вид и т.д.

Подмножество признаков психофизиологической природы  $\{x_{l,пфп}\}$  содержит признаки, которые оцениваются экспертом без объективного обоснования предпочтений, основанных на его личном восприятии каких-либо свойств объекта экспертизы. Например, цвет автомобиля или мобильного телефона, расположенность объекта строительства, удобство пользования программой планирования ресурсов и т.д.

Подмножество признаков отрицательного эффекта  $\{x_{k,отр}\}$ . К таким признакам относятся: стоимость лицензии  $P_{лиц}$ , стоимость внедрения  $P_{внед}$ , длительность срока внедрения (мес.)  $T_{внед}$ .

Приведенная кластеризация признаков позволит решить основную проблему традиционного метода анализа иерархий — психологическую неспособность экспертов уверенно различать более 5-6 признаков, поскольку при этом общее количество признаков экспертизы делится на небольшие группы.

Рассмотрим мультипликативную модель детерминированного комплексного показателя качество-цена [5]:

$$J = \left[ V_{кол} \frac{\sum_j V_{j,кол} X_{j,кол}}{\sum_j V_{j,кол}} + V_{нал} \frac{\sum_i V_{i,нал} X_{i,нал}}{m_{нал} \sum_i V_{i,нал}} + V_{кач.пр.} \frac{\sum_l V_{l,кач.пр.} \bar{X}_{l,кач.пр.}}{\sum_l V_{l,кач.пр.}} \right] \times \frac{1}{V_{кол} + V_{нал} + V_{кач}} \cdot J_{цены} = J_{кач} \cdot J_{цены}, \quad (2)$$

где  $V_{кол}$ ,  $V_{нал}$ ,  $V_{кач.пр.}$  — групповые весовые коэффициенты, определяющие предпочтительность количественных признаков, признаков наличия и качественных признаков соответственно; множества  $\{V_j, V_i, V_l\}$  определяют относительный вклад отдельных признаков (частных критериев);  $m_{нал}$  — общее число признаков наличия. В формуле (2) признаки психологической природы (их обычно немного — 2-3) и признаки положительного эффекта объединены в одну группу, поскольку порядок их учета одинаков. Влияние признаков отрицательного эффекта учитывается в функции цены  $J_{цены}$  и будет рассмотрено отдельно.

Нетрудно убедиться в том, что применяемые в (2) нормировки делением на сумму как групповых, так и частных весовых коэффициентов обеспечивает достижение функционалом  $J_{кач}$  значения единицы в том случае, когда все частные критерии будут



равны единице. В функциональном анализе такие нормировки соответствуют пространству  $R_1^s$ , где  $s$  — количество слагаемых во взвешенной сумме.

Для отдельных признаков вводится и другая нормировка — в пространстве  $R_0^m$ :

$$x_j = \frac{x_j}{x_{j, \text{баз}}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где знаменатель — максимальное значение признака по всем  $K$  объектам

$$x_{j, \text{баз}} = \max_k x_j^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Нормированные таким образом значения признаков  $x_j \in [0, 1]$ ,  $\forall j$ . Соответственно, и значение функционала  $J_{\text{кач}} \in [0, 1]$ .

**Метод анализа иерархий с разделяющимися признаками.** В основе решения многокритериальных задач лежит ранжирование частных критериев (признаков). Значимость рангов частных критериев определяется на основе их попарного сравнения с помощью шкалы лингвистических оценок. В соответствии с методом анализа иерархий [1—3] лингвистическая шкала состоит из девяти градаций оценок относительной важности. Считается, что выбранный частный критерий: строго эквивалентен другому — 1; слабо предпочтительнее — 3; несколько предпочтительнее — 5; значительно предпочтительнее — 7; строго предпочтительнее — 9.

Пусть  $A$  — матрица парных сравнений, построенная на основе определенных экспертами значений элементов матрицы  $a_{ij} = V_i / V_j$ . Эти значения (ранги частных критериев), как правило, выбираются из представленной выше девятибалльной шкалы. Тогда должно выполняться соотношение  $a_{ji} = 1 / a_{ij}$ , т.е. матрица  $A$  должна быть обратнo-симметричной.

Искомый вектор коэффициентов относительной важности (вектор приоритетов) имеет вид

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_m). \quad (4)$$

В идеальном случае  $V$  является собственным вектором матрицы  $A$  и может быть найден как решение уравнения

$$AV = \lambda V \quad (5)$$

где  $\lambda$  — собственное значение матрицы  $A$ .

Особую важность имеют матрицы, не только обладающие приведенными выше свойствами, но и являющиеся согласованными, что означает наличие важного соотношения согласованности

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}. \quad (6)$$

На практике в силу субъективности оценок экспертов это условие чаще всего не выполняется.

Информативным критерием достоверности определения рангов является индекс согласованности (ИС) матрицы парных сравнений  $A$ , который дает информацию о степени нарушения согласованности. Индекс согласованности для каждой матрицы рассчитывается на основе оценки максимальной величины собственного значения матрицы по формуле

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}, \quad (7)$$

где  $m$  — размерность матрицы парных сравнений. Для обратно-симметричной матрицы всегда  $\lambda_{max} \geq m$ .

На основе индекса согласованности ИС рассчитывается показатель отношения согласованности  $ОС = ИС/СС$ , где  $СС$  — значение согласованности случайной матрицы того же порядка.

Средние значения согласованности  $СС$  для случайных матриц разного порядка  $m = 1, 2, \dots, 10$ , полученные при случайном выборе рангов из шкалы  $1/9, 1/8, 1/7, \dots, 1, 2, \dots, 9$  и образовании обратно-симметричной матрицы, имеют следующий вид [3]:

$$0,00 \ 0,00 \ 0,58 \ 0,90 \ 1,12 \ 1,24 \ 1,32 \ 1,41 \ 1,45 \ 1,49$$

В работах [1—3] на основе обобщения опыта решения большого числа многокритериальных задач утверждается, что, для того, чтобы парные сравнения можно было считать согласованными, величина  $ОС$  должна быть менее, чем 10%. Если  $ОС$  выходит из этих пределов, то экспертам нужно пересмотреть задачу и проверить свои суждения.

В матрицах больших размеров, начиная с 5-7 элементов, трудно добиться согласованности. Это объясняется психологическими особенностями мышления экспертов — человеку трудно сопоставить между собой слишком большое количество объектов.

Разрабатываемая нами методика позволяет решить эту проблему делением всего множества частных критериев на подмножества количественных признаков, признаков наличия, качественных признаков. В каждой из этих групп собрано сравнительно небольшое число однородных признаков, что существенно облегчает построение соответствующих матриц парных сравнений.

В отличие от традиционного подхода к построению матрицы парных сравнений [1, 2] предложим блочно-диагональную форму этой матрицы, где по главной диагонали будут расположены блоки частных матриц сравнения, соответствующих выделенным выше пяти кластерам признаков:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline A_{\text{кол}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & A_{\text{нал}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & A_{\text{пэф}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & A_{\text{пфп}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & A_{\text{груп}} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & A_{\text{отр}} \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Диагональные блоки являются квадратными матрицами парных сравнений, размерность которых определяется количеством признаков в каждом из кластеров. Остальные блоки, обозначенные 0, являются матрицами из нулевых элементов соответствующей размерности.

Вторым этапом алгоритма является определение вектора собственных значений, который для блочно-диагональной матрицы парных сравнений  $A$  примет блочно-последовательный вид:

$$(\Lambda_A)^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \Lambda_{\text{кол}} & \Lambda_{\text{нал}} & \Lambda_{\text{пэф}} & \Lambda_{\text{пфп}} & \Lambda_{\text{груп}} & \Lambda_{\text{отр}} \\ \hline \end{array}$$

В каждой из клеток размерности  $(m_s \times 1)$ ,  $s=1—6$  содержатся векторы собственных значений для каждого вида признаков. Максимальное собственное значение  $\lambda_{max}^s$  определяет степень согласованности каждой из частных матриц парных сравнений.

Третьим этапом алгоритма является определение собственных векторов расширенной матрицы  $A$ . Совокупность векторов образует блочно-диагональную матрицу

$$V = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline V_{\text{кол}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & V_{\text{нал}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{\text{пэф}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{\text{пфп}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{\text{груп}} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{\text{отр}} \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Диагональные блоки являются квадратными матрицами собственных векторов, размерность которых определяется количеством признаков в каждом из кластеров. Остальные блоки, обозначенные  $\mathbf{0}$ , являются матрицами из нулевых элементов соответствующей размерности. Первый собственный вектор в каждой из клеток определяет вектор приоритетов весовых коэффициентов для различных кластеров признаков.

Четвертый этап заключается в определении признаков  $x_i$  сравниваемых объектов экспертизы и определении нормированных значений признаков  $\bar{x}_i$  согласно формуле (3). Для признаков отрицательного эффекта используется другая нормировка, которая будет приведена далее.

На заключительном, пятом этапе на основе найденных значений нормированных признаков  $x_i^{(k)}$  и определенного ранее множества весовых коэффициентов  $V$  осуществляется вычисление показателя качества  $J_{\text{кач}}^{(k)}$  и обобщенной функции цены  $J_{\text{цены}}^{(k)}$  каждого  $k$ -го объекта экспертизы согласно формуле (2). Итоговым результатом является расчет комплексного показателя качества  $J^{(k)}$   $k = 1, 2, \dots$  для всех сравниваемых объектов экспертизы.

**Оценка показателей качества альтернативных ERP-систем.** Для отечественного рынка особое значение имеют стоимостно-внедренческие характеристики: стоимость лицензии, стоимость внедрения, среднее время внедрения, доступность программного обеспечения и т.д. При оценке отношения «качество-цена» бессмысленно сравнивать дорогие ERP-системы с простой и дешевой отечественной «1С: Бухгалтерией». Поэтому сравним между собой две системы одного класса: «SAP Business One» (Германия) и отечественную систему «Галактика Business Suite», основываясь на данных, содержащихся в обзоре фирмы «Hansa World» [5], фрагмент которого представлен в статье [4]. Отметим, что в отличие от упомянутой статьи в данной работе рассмотрена более распространенная ERP-система, используемая, в частности, на воронежском предприятии «Воронежсинтезкаучук».

«SAP Business One» является самым младшим предложением в линейке решений SAP. Это самостоятельное решение, предназначенное для предприятий среднего бизнеса, работающих в сферах промышленности, торговли и оказания сервисных услуг. Прежде всего, это экономическая управленческая система, позволяющая

автоматизировать работу отдела продаж, закупки, ведение бухгалтерского и складского учета и финансы.

Основываясь на данных обзора характеристик сравниваемых систем [4,5], построим таблицу (табл.1). В таблице приведены признаки сравниваемых систем  $x_i$  и нормированные значения признаков  $x_i$ , рассчитанные по формуле (2).

Таблица 1  
Характеристики сравниваемых ERP

Признаки		SAP Business One		Галактика ERP	
№	Наименование	$x_i$	$x_i$	$x_i$	$x_i$
1	Количество пользователей	до 1000	1,0	до 330	0,33
2	Количество внедрений	> 12500	1,0	> 6000	0,48
3	Доля на рынке ERP-систем, %	9,8%	1,0	5%	0,51
Взвешенная сумма количественных признаков		1,0		0,396	
4	Количество учитываемых хозяйственных процессов	7	0,78	9	1,0
Взвешенная сумма признаков наличия		0,78		1,0	
5	Доступность программного обеспечения	труднодоступное	0,4	легкодоступное	1,0
6	Разработчик	Германия	1,0	Россия	0,8
7	Локализация	дополн. услуги	0,6	русский	1,0
8	Требования к системе	Windows; SQL, Oracle	1,0	Windows; SQL, Oracle	1,0
9	Возможность удаленного использования	WEB-интерфейс	1,0	обмен данными	0,6
10	Гибкость	программирование	1,0	параметризация	0,4
11	Электронная почта (e-mail)	есть	1,0	нет	0,6
Взвешенная сумма качественных признаков		0,783		0,822	

Для каждой из этих систем требуется выполнить следующие действия: 1) оценить групповые коэффициенты; 2) определить вклад признаков: количественных, наличия и качественных; 3) ввести стоимостно-внедренческую характеристику.

1. Количественные признаки. К таким признакам относятся: 1) максимальное количество пользователей; 2) количество известных внедрений; 3) доля на рынке ERP-систем (%).

2. Признаки наличия. К таким признакам отнесем наиболее важные характеристики рассматриваемых систем — возможности анализа конкретных хозяйственных процессов. В упомянутом выше обзоре фирмы Hansa World [5] перечислены следую-

щие функциональные возможности: 1) финансы; 2) учет основных средств; 3) расчеты с подотчетными лицами; 4) управление персоналом и оплата труда; 5) закупки; 6) продажи; 7) склад; 8) производство; 9) бухгалтерская отчетность; 10) управление проектами.

Для системы «SAP Business One» реализуется 7 таких признаков, а системы «Галактика ERP» — 9. Считаем эти признаки равнозначными, поэтому для оценки признаков наличия матрица парных сравнений не используется.

3. Качественные признаки. К таким признакам относятся признаки 5—11 (табл.1), среди которых наиболее важными представляются: доступность программного обеспечения и страна разработчика.

Применяя предложенный выше метод анализа иерархий с разделением признаков (МАИ РП) построим обобщенную матрицу парных сравнений  $A$  для количественных и качественных признаков:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 3 & 7 & 3 & 5 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 5 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.2 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.2 & 0.33 & 1 & 0.33 & 0.5 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.2 & 1 & 3 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.5 & 1 & 2 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.33 & 1 & 3 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Как видим, полученная матрица имеет блочно-диагональный (клеточно-диагональный) вид. Верхняя клетка размерности  $3 \times 3$  соответствует парному сравнению количественных признаков. Ее первая строка содержит ранги предпочтения первого признака (максимальное количество пользователей) над признаками 2, 3 (см. табл. 1). Нижняя клетка размерности  $7 \times 7$  соответствует парному сравнению качественных признаков. Ее верхняя строка содержат ранги предпочтений равнозначных 5, 6 признаков над остальными 7—11 признаками.

С помощью встроенной функции  $\text{eigenvals}(A)$  программы Mathcad-14 определим собственные значения матрицы  $A$ :

$$\begin{pmatrix} 3.047 \\ -0.023+ 0.402i \\ -0.023- 0.402i \\ 7.202 \\ -0.327+ 1.019i \\ -0.327- 1.019i \\ 0.214+ 1.017i \\ 0.214- 1.017i \\ 0.012+ 0.082i \\ 0.012- 0.082i \end{pmatrix}$$

Для верхней клетки матрицы А (размерности  $3 \times 3$ ) максимальное собственное число равняется 3,047. Индекс согласованности (ИС) равен 0,023, отношение согласованности (ОС) равно 0,040.

Для нижней клетки матрицы А (размерности  $7 \times 7$ ) максимальное собственное число равняется 7,202. Индекс согласованности (ИС) равен 0,002, отношение согласованности (ОС) равно 0,015.

С помощью встроенной функции `eigenvecs(A)` из Mathcad-14 определим собственные векторы матрицы А. В результате получим блочно-диагональную матрицу собственных векторов, в верхней клетке которой расположены собственные векторы для количественных признаков, а в нижней — для качественных признаков.

Для количественных признаков первый собственный вектор:

$$V_{кол} = (0,896 \quad 0,375 \quad 0,236), \quad \sum V_{i,кол} = 1,507,$$

а после нормировки делением на сумму признаков вектор приоритетов количественных признаков:

$$\tilde{V}_{кол} = (0,595 \quad 0,249 \quad 0,157). \quad (8)$$

Для качественных признаков первый собственный вектор:

$$V_{кач.пр} = (0,626 \quad 0,667 \quad 0,231 \quad 0,081 \quad 0,179 \quad 0,149 \quad 0,222),$$

а после нормировки делением на сумму весовых коэффициентов 2,155 получим вектор приоритетов количественных признаков:

$$\tilde{V}_{кач.пр} = (0,290 \quad 0,310 \quad 0,107 \quad 0,038 \quad 0,083 \quad 0,069 \quad 0,103). \quad (9)$$

С учетом рассчитанных векторов приоритетов (8), (9) рассчитаны и сведены в (табл. 1) взвешенные суммы количественных и качественных признаков. Взвешенные суммы признаков наличия (учитываемых хозяйственных процессов) определяются просто относительным числом учитываемых процессов (см. табл. 1).

Используя предложенный выше метод МАИ РП, составим расширенную блочно-диагональную матрицу групповых и стоимостно-внедренческих признаков В:

$$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 1 \end{pmatrix}$$

Верхняя левая клетка матрицы В соответствует групповым коэффициентам  $V_{\text{кол}}, V_{\text{нал}}, V_{\text{кач.пр.}}$ . При построении матрицы парных сравнений мы изменили порядок их рассмотрения с учетом того, что для данной задачи наиболее важными являются признаки наличия (функциональные возможности), на следующий порядок:  $V_{\text{нал}}, V_{\text{кол}}, V_{\text{кач.пр.}}$ .

Нижняя правая клетка матрицы В соответствует стоимостно-внедренческим признакам отрицательного эффекта. К таким признакам относятся: стоимость лицензии  $P_{\text{лиц}}$ , стоимость внедрения  $P_{\text{внед}}$ , длительность срока внедрения (мес.)  $T_{\text{внед}}$ .

Вместо использованной ранее нормировки признаков (2), (3) введем «обратную» нормировку:

$$x_{\text{лиц}}^{(k)} = \frac{P_{\text{лиц}}^{\circ}}{P_{\text{лиц}}^{(k)}}; \quad x_{\text{внед}}^{(k)} = \frac{P_{\text{внед}}^{\circ}}{P_{\text{внед}}^{(k)}}; \quad x_{\text{срок}}^{(k)} = \frac{T_{\text{внед}}^{\circ}}{T_{\text{внед}}^{(k)}}, \quad (10)$$

где верхним символом « $\circ$ » обозначены минимальные значения по группе сравниваемых объектов ( $k = 1, 2$ ):

$$P_{\text{лиц}}^{\circ} = \min_k P_{\text{лиц}}^{(k)}; \quad P_{\text{внед}}^{\circ} = \min_k P_{\text{внед}}^{(k)}; \quad T_{\text{внед}}^{\circ} = \min_k T_{\text{внед}}^{(k)}.$$

При такой нормировке, как и ранее, нормированные признаки принимают значения из отрезка  $[0, 1]$ .

Обобщенная функция цены с учетом стоимостно-внедренческих характеристик примет вид

$$J_{\text{цены}} = \frac{V_{\text{лиц}}x_{\text{лиц}} + V_{\text{внед}}x_{\text{внед}} + V_{\text{срок}}x_{\text{срок}}}{V_{\text{лиц}} + V_{\text{внед}} + V_{\text{срок}}}, \quad (11)$$

где весовые коэффициенты  $V_{\text{лиц}}, V_{\text{внед}}, V_{\text{срок}}$  определяются на основе нижней правой клетки расширенной матрицы парных сравнений В.

С помощью встроенной функции  $\text{eigenvals}(A)$  программы Mathcad-14 определим собственные значения матрицы В:

$$\begin{pmatrix} 3.001 \\ -2.774 \times 10^{-4} + 0.108i \\ -2.774 \times 10^{-4} - 0.108i \\ 3.054 \\ -0.027 + 0.404i \\ -0.027 - 0.404i \end{pmatrix}$$

Для верхней клетки матрицы В (размерности  $3 \times 3$ ) максимальное собственное число равняется 3,001. Индекс согласованности (ИС) равен 0,0002, отношение согласованности (ОС) равно 0,0003. Для нижней клетки матрицы В (размерности  $3 \times 3$ ) максимальное собственное число равняется 3,054. Индекс согласованности (ИС) равен 0,009, отношение согласованности (ОС) равно 0,016. Итак, расширенная матрица В является хорошо согласованной.

С помощью встроенной функции `eigenvecs(A)` из Mathcad-14 определим собственные векторы матрицы В. В результате получим блочно-диагональную матрицу собственных векторов, в верхней клетке которой расположены собственные векторы для групповых признаков, а в нижней — для стоимостно-внедренческих признаков:

$$\begin{pmatrix} 0.928 & 0.925 & 0.925 & 0 & 0 & 0 \\ 0.175 & -0.085 - 0.154i & -0.085 + 0.154i & 0 & 0 & 0 \\ 0.328 & -0.168 + 0.291i & -0.168 - 0.291i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.958 & 0.958 & 0.958 \\ 0 & 0 & 0 & 0.242 & -0.121 + 0.209i & -0.121 - 0.209i \\ 0 & 0 & 0 & 0.152 & -0.076 - 0.132i & -0.076 + 0.132i \end{pmatrix}$$

Для групповых признаков первый собственный вектор

$$V_{\text{груп}} = (0,928 \quad 0,175 \quad 0,328 \quad 0,000 \quad 0,000 \quad 0,000), \quad \sum V_{i,\text{груп}} = 1,431,$$

а после нормировки делением на эту сумму признаков вектор приоритетов групповых признаков

$$\tilde{V}'_{\text{груп}} = (0,648 \quad 0,174 \quad 0,109 \quad 0,000 \quad 0,000 \quad 0,000).$$

После перестановки коэффициентов в порядке: количественные, наличия и качественные признаки, получим окончательно

$$\tilde{V}_{\text{груп}} = (0,109 \quad 0,648 \quad 0,174). \tag{12}$$

Подставив полученные групповые весовые коэффициенты (12) и нормированные признаки  $x_i$  (см. табл. 1) в формулу (1) получим значения показателя качества  $J_{\text{кач}}$  для сравниваемых систем:

$$J_{\text{кач}}^{\text{SAP}} = 0,751; \quad J_{\text{кач}}^{\text{Галактика}} = 0,834. \tag{13}$$

Для стоимостно-внедренческих признаков первый собственный вектор



$$V_{\text{ст-вн}} = (0,000 \quad 0,000 \quad 0,000 \quad 0,958 \quad 0,242 \quad 0,152),$$

а после нормировки делением на сумму весовых коэффициентов 1,352 получим расширенный вектор приоритетов стоимостно-внедренческих признаков

$$\tilde{V}'_{\text{ст-вн}} = (0,000 \quad 0,000 \quad 0,000 \quad 0,708 \quad 0,178 \quad 0,112),$$

откуда вектор приоритетов

$$\tilde{V}_{\text{ст-вн}} = (0,708 \quad 0,178 \quad 0,112). \quad (14)$$

Сами значения стоимостно-внедренческих признаков  $x_i$  сравниваемых систем получены из обзора [5]. Нормировка признаков осуществляется согласно формуле (10), а нормированные значения 12—14 признаков  $x_i$  сведены в табл.2.

Таблица 2

Стоимостно-внедренческие признаки

ERP-системы:		SAP Business One		Галактика ERP	
Стоимостно-внедренческие признаки					
№	Наименование	$x_i$	$x_i$	$x_i$	$x_i$
12	Стоимость лицензий за рабочее место, евро	1500	0,333	500	1,0
13	Стоимость внедрения (от стоимости лицензий)	>100%	0,5	>50%	1,0
14	Срок внедрения (месяц)	4	1,0	8	0,5

С учетом нормированных значений признаков  $x_i$  и вектора приоритетов (14) обобщенная функция цены для сравниваемых систем примет следующие значения:

$$J_{\text{цены}}^{\text{SAP}} = 0,435; J_{\text{цены}}^{\text{Галактика}} = 0,942. \quad (15)$$

Комплексный показатель качество-цена  $J = J_{\text{кач}} \cdot J_{\text{цен}}$  с учетом рассчитанных величин (13), (15) для сравниваемых систем

$$J = 0,326; J = 0,785. \quad (16)$$

Как видим, значения собственно показателя качества  $J_{\text{кач}}$  для двух систем примерно одинаковы (0,751, 0,834), однако отечественная «Галактика ERP» имеет значительно лучшие стоимостно-внедренческие характеристики. За счет этого комплексный показатель качество-цена отечественной системы оказался практически в два раза выше.

Таким образом при реализации традиционного метода анализа иерархий возникают два затруднения. Во-первых, в связи с психофизиологическими особенностями человеческого мышления эксперты не могут уверенно оценивать более 5-6 объектов. Во-вторых, для менее важных объектов весовые коэффициенты оказываются чрезвычайно заниженными по сравнению с методом прямого ранжирования.

Для преодоления этих недостатков введена кластеризация множества признаков объекта экспертизы на пять групп. Обычная матрица парных сравнений заменяется на блочно-диагональную матрицу, в каждом из блоков которой уверенно достигается со-

гласованность. Рассмотрены основные этапы алгоритма и в качестве примера осуществлена экспертиза двух современных ERP-систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саати Т.Л. Принятие решений: метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
2. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети: пер. с англ. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 360 с.
3. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 397 с.
4. Иерархическое представление проблемы, шкала отношений и матрицы парных сравнений [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.ecosyn.ru/page/0010.html> (дата обращения: 14.04.12).
5. Бухарин С.В., Мельников А.В. Многокритериальная экспертиза ERP-систем с учетом стоимостно-внедренческих характеристик // Вестник Воронежского института МВД России. — 2011. — № 3. — С. 135—143.
6. Обзор и сравнение основных ERP-решений на российском рынке: Review of Hansa World [Электронный ресурс]. — URL <http://hansa.dm.ru/pages/compare2> (дата обращения: 14.04.2012).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Мельников Александр Владимирович. Старший преподаватель кафедры огневой подготовки. Кандидат технических наук.  
Воронежский институт МВД России.  
E-mail: meln78@mail.ru  
Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473)2623-397

Melnikov Alexander Vladimirovich. Senior lecturer of the chair of Range Practice. Candidate of technical sciences.  
Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.  
Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)2623-397.

**Ключевые слова к статье:** нечеткие множества; объект экспертизы; ERP-система.

**Key words:** fuzzy sets; expert examination object; property function; ERP-system.

**УДК 657**