

**На правах рукописи**

**БЫСТРОВ Сергей Юрьевич**

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ  
ОСОБО ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление  
и обработка информации**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**ПЕНЗА 2004**



Работа выполнена в Пензенском государственном университете на кафедре «Вычислительная техника».

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор **Макарычев П. П.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Лебедев В. Б.;  
доктор технических наук,  
профессор Горбаченко В. И.

Ведущая организация - ФГУП «НПП «Рубин», г. Пенза.

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г., в \_\_\_\_\_ часов, на заседании диссертационного совета Д 212.186.04 при Пензенском государственном университете по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

**Смогунов В. В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ:

**Актуальность темы.** Изменения в общественно-экономической формации, произошедшие в последние годы в России, вызвали резкий рост угрозы безопасности военных и крупных промышленных объектов России, в первую очередь, объектов ядерно-оружейного комплекса, предприятий- ядерной энергетики, объектов топливно-энергетического комплекса, химической отрасли и т. п. Это связано с ростом масштабов внутреннего и международного терроризма, появлением в стране организованной преступности, с высоким уровнем внутригосударственной экономической и социальной напряженности. Основой систем безопасности особо важных объектов являются системы физической защиты (СФЗ) на базе комплексов инженерно-технических средств физической защиты (ИТСФЗ), обеспечивающих решение задач обнаружения и пресечения несанкционированных действий персонала и посторонних лиц.

Актуальность задачи совершенствования средств анализа и оптимизации СФЗ, особенно на ранних этапах разработки проекта, определяется жесткими требованиями, предъявляемыми к эффективности СФЗ, увеличением числа альтернативных вариантов построения системы вследствие возрастающей сложности ее структуры. При этом высокая стоимость СФЗ не позволяет провести практическую проверку полученных проектных решений.

Средства анализа и оптимизации СФЗ в настоящее время развиваются крайне медленно. Это обусловлено наличием, ряда проблем. Основная проблема состоит в том, что СФЗ представляет собой конфликтную систему с антагонистическими интересами, вследствие чего в процесс ее анализа и оптимизации вносится элемент неопределенности. Отсутствие единого понятийного аппарата и показателей эффективности приводит к росту влияния субъективных факторов при принятии проектных решений. Кроме того, для решения задач анализа и оптимизации СФЗ в первую очередь необходима разработка, формализованного описания, показателей эффективности системы и методик их получения, способов структурного и параметрического синтеза систем защиты.

В настоящее время намечились основные тенденции решения указанных проблем. Ведутся работы по созданию единого понятийного



аппарата и выработке единых критериев оценки, предложены методики параметрического синтеза СФЗ. Вопросы создания СФЗ особо важных объектов нашли свое отражение в работах российских ученых Ю. А. Оленина, А. В. Измайлова, Г. Е. Шепитько, Э. И. Абалмазова и других.

Однако многие вопросы анализа и оптимизации СФЗ остаются нерешенными. В частности, большинство предлагаемых показателей эффективности СФЗ не позволяют в полной мере учесть взаимное влияние элементов системы и не применимы для анализа СФЗ объектов со сложной топологией при наличии множества предметов защиты, что затрудняет использование существующих методов решения задачи оптимизации.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование средств анализа и оптимального синтеза систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка математической модели систем физической защиты объектов со сложной топологией, адекватно отображающей связи внутри системы для решения задачи оценки и оптимизации по критерию «эффективность - стоимость»;
- исследование и теоретическое обоснование функционально-стоимостных показателей эффективности СФЗ особо важных объектов;
- определение функциональных зависимостей интегральных показателей эффективности СФЗ от параметров ее подсистем;
- разработка способа и алгоритмов оптимального синтеза СФЗ особо важных объектов со сложной топологией на основе заданного набора опций реализации рубежей защиты;
- теоретическое и экспериментальное исследование алгоритмов оптимального синтеза СФЗ объектов со сложной топологией.

**Методологической основой работы** являются методы системного анализа, методы динамического программирования, математический аппарат теории графов, теории вероятностей, теории алгоритмов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель систем физической защиты особо важных объектов на основе сети с кратными дугами.

В отличие от известных модель позволяет описать СФЗ объектов со сложной топологией на заданном уровне декомпозиции и получить интегральную оценку эффективности СФЗ при наличии множества предметов защиты без применения операции редукции вектора эффективности к интегральному показателю.

2. Разработаны и обоснованы интегральные функционально-стоимостные показатели эффективности СФЗ особо важных объектов. В отличие от известных предложенные показатели позволяют выполнять оптимизацию СФЗ с учетом принципов равнопрочности и адекватности для предметов защиты различной категории.

3. Получены функциональные зависимости интегральных показателей эффективности СФЗ от параметров ее подсистем, позволяющие, в отличие от известных, обобщить способ количественной оценки эффективности для субъектов защиты со сложной структурой подсистем.

4. Предложены эквивалентные преобразования на взвешенных графах, которые позволяют формализовать процесс агрегирования на модели СФЗ при решении задачи оптимизации.

5. Разработан алгоритм поиска последовательности эквивалентных преобразований, приводящих исходную модель к трехэлементной модели, что позволяет представить непоследовательный процесс выбора оптимального управления последовательным.

6. Предложен способ оптимизации СФЗ особо важных объектов со сложной топологией. В отличие от известных предложенный способ позволяет выполнять оптимизацию на всем множестве возможных вариантов реализации при заданных ограничениях на используемые ресурсы с учетом топологии и взаимного влияния подсистем СФЗ, что дает возможность значительно снизить влияние субъективного фактора на результаты оптимизации.

Практическая значимость работы состоит в создании новых, более эффективных средств оптимального синтеза систем физической защиты объектов, что позволяет сократить затраты на разработку и повысить качество концептуального проекта. В работе получены следующие практические результаты:

1. Алгоритм оптимального синтеза систем физической защиты особо важных объектов на заданном наборе опций реализаций рубежей защиты. В отличие от известного алгоритма прямого перебора,

имеющего экспоненциальную зависимость времени работы от количества опций реализации рубежей защиты, сложность предложенного алгоритма имеет линейную зависимость.

2. Программная реализация предложенного алгоритма «Analyzer», позволяющая автоматизировать процесс оптимизации СФЗ на этапе разработки концептуального проекта, существенно снизить время проектирования и влияние субъективных факторов.

**Реализация и внедрение результатов.** Основные результаты и положения диссертационной работы использованы ДГУП Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники (НИКИРЭТ) ФГУП «СНПО «Элерон» (г. Заречный Пензенской обл.).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией на основе сети с кратными дугами.

2. Интегральные функционально-стоимостные показатели эффективности систем физической защиты и их функциональные зависимости от параметров, входящих в нее подсистем.

3. Операции параллельного и последовательного агрегирования на модели систем физической защиты с использованием преобразований на взвешенных графах.

4. Алгоритм поиска на графе последовательности эквивалентных преобразований, приводящих исходную модель к трехэлементной модели.

5. Способ решения задачи оптимизации систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией на заданном наборе опций реализации рубежей защиты методом динамического программирования.

6. Алгоритм оптимизации систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией и его программная реализация.

**Апробация-работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III Всероссийской научно-практической конференции «Технические средства охраны. Комплексы охранной сигнализации и

системы управления доступом» (г. Заречный,- Пензенская область, 2000 г.);

— IV Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы» (г. Пенза, 2000 г.);

- XII Международной школе-семинаре «Синтез и сложность управляющих систем» (г. Пенза, 2001 г.);

- IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов» (г. Заречный, Пензенская область, 2002 г.);

- VI Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии» (г. Москва, 2003 г.);

— XIV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов (г. Пенза, 2003 г.);

— Всероссийской научно-технической конференции «Вооружение, безопасность, конверсия» (г. Пенза, 2003 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ, в том числе 5 статей, 5 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы из 72 наименований. Работа содержит 144 страницы основного текста, 25 рисунков и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показаны его научная новизна и практическая значимость, перечислены методы исследований, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе вводятся основные понятия, рассматриваются вопросы концептуального проектирования СФЗ, стратегии и тактики защиты. Проводится анализ известных методов оценки эффективности и оптимизации СФЗ, обосновывается выбор метода решения задачи оптимизации.

Под системой физической защиты понимается совокупность организационных и инженерно-технических мероприятий, направленных

ных на пресечение угроз объекту со стороны вероятных внешних и внутренних нарушителей.

Жизненный цикл СФЗ включает следующие основные этапы: разработка концептуального проекта (КП), разработка технического задания, рабочее проектирование, строительные-монтажные и пусконаладочные работы, эксплуатация, гарантийное и послегарантийное обслуживание, вывод системы из эксплуатации.

Наиболее важным этапом является этап разработки КП, на котором решаются следующие задачи: определение целей защиты, предметов физической защиты, анализ возможных угроз и разработка моделей нарушителей, разработка стратегии и тактики защиты, разработка структуры и состава СФЗ, оценка эффективности СФЗ и оптимизация ее структуры по выбранным критериям и технико-экономическое обоснование проекта.

На выбор критериев оптимальности СФЗ значительное влияние оказывает принятая стратегия защиты. Стратегия, которая наиболее часто применяется для СФЗ особо важных объектов, направлена на обеспечение максимальной эффективности. Кроме того, может применяться стратегия, направленная на обеспечение максимальной средней эффективности на единицу затрат.

Получение объективных показателей эффективности СФЗ связано с проблемами, характерными для сложных конфликтных систем с антагонистическими интересами: наличие большого числа взаимосвязанных элементов, принципиальная неопределенность из-за неполной информации о потенциальном противнике и его действиях, многообразии условий функционирования системы.

Количественная оценка эффективности таких систем строится в основном на использовании математического аппарата теории вероятностей, теории множеств, методов имитационного моделирования. Используются различные методы получения показателей эффективности: аналитические, статистические, экспертные и другие.

В работе проведен сравнительный анализ различных показателей и моделей систем физической защиты. В основе большинства моделей лежит модель EASI, предложенная Сандийскими национальными лабораториями (SNL) США. В данной модели в качестве показателя эффективности используется вероятность пресечения несанкционированных действий (НСД), которая определяется как вероят-



ность своевременного обнаружения НСД, т. е. обнаружение на таком этапе развития атаки, на котором время завершения НСД превышает время развертывания подразделения сил охраны (ПСО). На основе данной модели разработаны различные программные продукты оценки уязвимости СФЗ, позволяющие оценить эффективность СФЗ как вероятность пресечения НСД  $W_{i \text{ на}}$  для каждого вида угрозы и предмета защиты, но не обеспечивающие получение интегрального показателя эффективности СФЗ. В наиболее общем виде показатель  $W_{i \text{ на}}$  зависит от вероятности своевременного и достоверного обнаружения НСД, вероятности достоверной оценки тревожной ситуации, вероятности достоверной передачи сигнала тревоги силам охраны, вероятности безотказной работы технических средств, вероятности своевременного развертывания ПСО в точке перехвата после получения сигнала тревоги, вероятности благоприятного исхода боевого столкновения и других.

Другой подход, основанный на использовании ранговых коэффициентов, позволяет получить интегральный показатель эффективности. Однако количественная оценка данного показателя на основе параметров СФЗ является достаточно сложной задачей.

Существуют различные способы оптимизации СФЗ, основанные на рассмотренных показателях эффективности: метод нормированных частных производных, позволяющий достичь сбалансированности СФЗ, метод линейной целевой функции, учитывающий категорирование предметов защиты по важности, метод многорубежной матрицы угроз, основанный на экспертных оценках и другие. Кроме того, широкое применение находят методы, использующие программные пакеты оценки уязвимости в сочетании с различными численными методами, в частности, с методом динамического программирования (ДП).

Проведенный анализ позволяет уточнить требования к модели СФЗ, показателям эффективности и методу оптимизации.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией и получению интегральных показателей ее эффективности.

В общем случае система физической защиты представляется в виде трехэлементной системы, модель которой представлена на

рисунке 1. В модели СФЗ выделяются три подсистемы: объект защиты, субъект угрозы и субъект защиты.

Основой системы является объект защиты, характеризуемый значимостью  $C$  - экономической мерой ущерба или потерь при полной реализации угрозы. Объект защиты подвергается различным воздействиям со стороны других систем, в том числе и опасным, т. е. приводящим к недопустимому изменению его системных качеств.

Система, воздействия которой являются опасными, представляет собой субъект угрозы, характеристикой которого является вероятность возникновения угрозы  $P$ . Снижение уровня опасного воздействия субъекта угрозы на объект защиты достигается применением подсистемы «субъект защиты». Показателем эффективности при этом является отношение потенциала начального воздействия субъекта угрозы 1 и итогового - 2. В качестве показателя эффективности субъекта защиты  $W$  используется вероятность пресечения угрозы субъектом защиты.

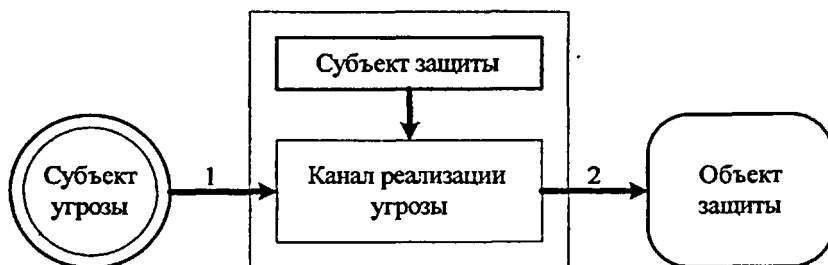


Рисунок 1

Интегральным экономическим показателем эффективности СФЗ является риск от реализации угрозы  $R$  — количественная оценка вероятностного ущерба при реализации атаки субъекта угрозы на объект защиты через канал реализации угрозы при воздействии субъекта защиты:

$$R = (1 - W) C \cdot P. \quad (1)$$

При оптимизации в зависимости от применяемой стратегии построения для оценки качества СФЗ используются показатель эффективности

$$\dot{Y} = W \cdot P \cdot C \quad (2)$$

или показатель средней эффективности на единицу затрат

$$Q = \dot{Y}/B, \quad (3)$$

где  $B$  - условная стоимость СФЗ.

Субъект защиты возлагает решение различных задач защиты на отдельные подсистемы. Системные качества каждой подсистемы оцениваются эффективностью субъекта защиты при решении  $i$ -й задачи  $W^i$ . Рассматриваются два базовых варианта взаимодействия подсистем: параллельно и последовательно функционирующие подсистемы защиты. В первом случае предотвращение угрозы достигается при предотвращении угрозы хотя бы одной из подсистем защиты, во втором случае - только при успешном выполнении своих функций каждой из подсистем. Эффективность субъекта защиты  $W$  в целом определяется через эффективность совместного решения задач защиты каждой подсистемой в соответствии с выражениями:

$$W^{\text{параллельно}} = 1 - \prod_i (1 - W^i), \quad (4)$$

$$W^{\text{последовательно}} = \prod_i W^i, \quad (5)$$

где  $W^{\text{параллельно}}$ ,  $W^{\text{последовательно}}$  - эффективность субъекта защиты с параллельно и последовательно функционирующими подсистемами соответственно.

Для построения модели СФЗ объекта со сложной топологией выполняется декомпозиция модели СФЗ, представленной на рисунке 1, на основе структуры объекта защиты. В модель включаются элементы объекта защиты и элементы внешней среды, оказывающие влияние на уровень полезного системного качества объекта защиты и связи между ними. Полученная модель задается конечным ориентированным мультиграфом  $S$ , представляющим собой двухполюсную сеть:

$$S = S(X, \Gamma, s, d), \quad (6)$$

где  $X$  - конечное множество вершин графа  $S$ ;  $\Gamma$  - отображение  $\Gamma: X \rightarrow X \times z_+$ , заданное конечным множеством дуг  $U \subset X \times X \times z_+$ ,

$z_+$  - множество неотрицательных целых чисел. Каждая дуга графа  $u_k \in U$  представляет собой субъект защиты, а вершина  $x_i \in X$  - объект защиты относительно множества вершин  $\Gamma^{-1}x_i$  и субъект угрозы относительно множества вершин  $\Gamma x_i$ . Вершины  $s \in X$  и  $d \in X$  являются входом и выходом сети и определяют интегральный субъект угрозы и интегральный объект защиты соответственно, что позволяет получить интегральный показатель эффективности СФЗ при наличии множества предметов защиты в зависимости от риска реализации угрозы субъекта угрозы  $s$  относительно объекта защиты  $d$ .

Для получения оценки эффективности СФЗ на графе  $S$  вводится функция  $W : U \rightarrow [0, 1]$ . Функция  $W(u_k)$  учитывает структурные особенности модели и имеет вид:

$$W(u_k) = \begin{cases} W_k, & \text{если } \text{Pr}_1 u_k \notin \Gamma^{-1}d, \text{Pr}_2 u_k \notin \Gamma s; \\ 1 - C_j, & \text{если } \text{Pr}_1 u_k = x_j \in \Gamma^{-1}d; \\ 1 - P_i, & \text{если } \text{Pr}_2 u_k = x_i \in \Gamma s, \end{cases} \quad (7)$$

где  $W_k \in [0, 1]$  - эффективность субъекта защиты  $u_k$ ;  $C_j \in [0, 1]$  - относительная значимость объекта защиты  $x_j$ ;  $P_i \in [0, 1]$  - относительная вероятность возникновения угрозы от субъекта угрозы  $x_i$ .

Тогда в соответствии с принципом гарантированного результата интегральный показатель риска

$$R = 1 - \min_{m \in M} w_m(m), \quad (8)$$

где  $M = \{m\}$  - множество всех путей на графе  $S$  из вершины  $s$  в вершину  $d$ ;  $w_m(m)$  - эффективность защиты на маршруте  $m$ , которая определяется в соответствии с выражением (4) для параллельно функционирующих субъектов защиты:

$$w_m(m) = 1 - \prod_{u_k \in m} (1 - W(u_k)). \quad (9)$$

Для построения модели на основе пространственной структуры объекта защиты используется зона защиты - множество точек пространства  $V_i$ , относительно которых выполняются функции защиты. Объект защиты представляет собой множество непересекающихся зон защиты  $V = \{V_i\}$  такое, что из  $i \neq j \Rightarrow V_i \cap V_j = \emptyset$ . На множестве зон защиты определяется отображение  $f: V \rightarrow X$  такое, что из  $V_i \in V \Rightarrow x_i \in X$ . Взаимодействие между зонами защиты осуществляется через рубежи защиты, формально представленные в модели множеством субъектов защиты  $U$

Эффективность субъекта защиты  $W_k$  зависит от параметров СФЗ, заданных кортежем  $z = (z_1, \dots, z_k, \dots, z_N)$ , где  $N$  - количество дуг графа (рубежей защиты);  $z_k$  - множество параметров, поставленных в соответствие каждому рубежу защиты  $u_k \in U$

Каждый рубеж защиты  $u_k$  характеризуется множеством методов его преодоления. При этом множество параметров рубежа задается множеством кортежей  $z_k = \{a_{k,i}, \dots, a_{k,i}, \dots, a_{k,n_m}\}$ , где  $a_{k,i}$  - кортеж параметров рубежа защиты  $u_k$  при его преодолении методом  $i$ ;  $n_m$  - количество методов преодоления рубежа. Эффективность рубежа защиты  $W_k$  в этом случае определяется в соответствии с принципом гарантированного результата:

$$W_k = \min_i W^{i \Delta \Delta}(a_{k,i}), \quad (10)$$

где  $W^{i \Delta \Delta}(a_{k,i})$  — эффективность защиты для метода  $i$  преодоления рубежа субъектом угрозы  $u_k$ .

В работе рассматриваются вопросы оценки эффективности рубежа защиты для заданного метода его преодоления на основе параметров входящих в него подсистем.

Оценка эффективности рубежа защиты  $u_k$  при его преодолении методом  $i$  определяется на основе вероятности обнаружения НСД  $W^{i \Delta \Delta}$ , интенсивности ложных тревог (ИЛТ) используемых средств

обнаружения, вероятности готовности ПСО  $W^{\text{гот}}$ , вероятности своевременного развертывания ПСО  $W^{\text{раз}}$ , вероятности благоприятного исхода боевого столкновения  $W$ , вероятности предотвращения угрозы  $W^{\text{пред}}$

Каждая из указанных характеристик определяет эффективность соответствующей подсистемы рубежа защиты  $u_k$ . Эффективность рубежа в целом при преодолении методом  $i$  определяется с учетом выражений (4) и (5) следующим образом:

$$W^{\text{мет}}(a_{k,i}) = 1 - (1 - W^{\text{пред}}(a_{k,i})) \cdot (1 - W^{\text{мет}}_{\text{ПНСД}}(a_{k,i})), \quad (11)$$

где  $W^{\text{мет}}_{\text{ПНСД}} = W^{\text{обн}}(a_{k,i}) \cdot W^{\text{гот}}(a_{k,i}) \cdot W^{\text{раз}}(a_{k,i}) \cdot W^{\text{бс}}(a_{k,i})$  - эффективность пресечения НСД рубежом защиты  $k$  при его преодолении методом  $i$ .

Предложенная модель позволяет получить интегральный критерий эффективности в зависимости от множества параметров  $z$  и сформулировать задачу оптимизации СФЗ.

**В третьей главе** на основе предложенной модели и показателей эффективности формулируется задача оптимизации СФЗ методом динамического программирования.

На модели СФЗ задано множество  $Z$  несовместимых альтернатив реализации рубежей защиты (опций), характеризуемых набором параметров и условной стоимостью  $B$ . Необходимо получить такой набор опций  $z \in Z$ , который максимизирует интегральный показатель эффективности СФЗ при заданных ограничениях на используемые ресурсы  $B_0$  (стоимость СФЗ):

$$z^* = \underset{z \in Z, B(z) \leq B_0}{\text{argmax}} \quad \Xi(z). \quad (12)$$

Таким образом, задача оптимизации СФЗ является задачей оптимального распределения ресурсов по рубежам защиты, для решения которой применяется метод динамического программирования (ДП).

Применение метода ДП требует наличия последовательности шагов выбора оптимального управления. Этому требованию удовлетворяют частные случаи задачи оптимизации СФЗ: оптимизация системы только последовательно или только параллельно соединенных рубежей защиты.

Для СФЗ объектов со сложной топологией задача выбора-наилучшего набора опций реализации рубежей защиты  $z \in Z$  преобразуется в задачу оптимального распределения ресурсов. Для этого на модели СФЗ вводятся эквивалентные преобразования - операции параллельного и последовательного агрегирования.

Пусть задан граф (6) и существует подграф  $S' = (X', U')$ ,  $X' \subseteq X$ ,  $U' \subseteq U$  такой, что  $X' = \{a, b, c\}$ ,  $U' = \{v, u\}$ , где  $v = \langle a, b \rangle$ ,  $u = \langle b, c \rangle$ , и полустепень захода и исхода вершины  $b$  равна 1, т. е.  $d^+(b) = d^-(b) = 1$ , и на дугах  $v$  и  $u$  заданы функции эффективности  $W(v)$  и  $W(u)$ . Тогда операция последовательного агрегирования  $u' = v \succ u$  дугой  $u$  дуги  $v$  определяется, как операция удаления вершины  $b$  и добавления дуги  $u' = \langle a, c \rangle$  такой, что функция ее эффективности равна  $W(u') = 1 - ((1 - W(v)) \cdot (1 - W(u)))$ .

Операция параллельного агрегирования определяется для подграфа  $S' = (X', U')$ ,  $X' \subseteq X$ ,  $U' \subseteq U$  графа (6) такого, что  $X' = \{a, b\}$ ,  $U' = \{v, u\}$ , где  $v = \langle a, b \rangle$ ,  $u = \langle a, b \rangle$  и на дугах  $v$  и  $u$  заданы функции эффективности  $W(v)$  и  $W(u)$ . Тогда операция параллельного агрегирования  $u' = v \triangleright u$  дугой  $u$  дуги  $v$  определяется, как операция удаления дуг  $v = \langle a, b \rangle$ ,  $u = \langle a, b \rangle$  и добавления дуги  $u' = \langle a, b \rangle$  такой, что функция ее эффективности равна  $W(u') = \min(W(v), W(u))$ .

В главе рассматриваются условия существования последовательности операций агрегирования, преобразующих исходную сеть (6) в сеть

$$S' = (\{s, d\}, \{\langle s, d \rangle\}, s, d). \quad (13)$$

Применение операций агрегирования позволяет представить задачу распределения ресурсов как процесс, заданный последовательностью этапов — операций агрегирования, и сформулировать задачу оптимизации СФЗ методом ДП следующим образом:

1. Фазовые переменные (ФП). Вектор ФП имеет размерность  $n_f = 3$  и равен  $\mathbf{p}_q = (B_q, I_0, I_q)$ , где  $B_q$  определяет остаток финансовых ресурсов после применения управления на шаге  $q$ ;  $I_0$  определяет значение полной ИЛТ во всей системе;  $I_q$  определяет остаток запаса ИЛТ после применения управления на шаге  $q$ . В данной постановке задачи ИЛТ выступает в качестве специфического ресурса для распределения с тем, чтобы устранить обратную связь в последовательном процессе.

2. Управление. В качестве управления используются количество финансовых ресурсов  $B_q^{\text{исп}}$  и запас ИЛТ  $I_q^{\text{исп}}$  используемых данным рубежом, в том числе и агрегирующими рубежами. Вектор управления на шаге  $k$  имеет размерность  $n_c = 2$  и равен  $\mathbf{v}_q = (B_q^{\text{исп}}, I_q^{\text{исп}})$ .

3. Уравнение процесса. Состояние системы  $\mathbf{p}_q = (B_q, I_0, I_q)$ , установившееся на шаге  $q$ , зависит от состояния на предыдущем шаге  $\mathbf{p}_{q-1}$  и примененного управления  $\mathbf{v}_q = (B_q^{\text{исп}}, I_q^{\text{исп}})$ , при этом полная ИЛТ не меняется:

$$B_q = B_{q-1} - B_q^{\text{исп}}, I_q = I_{q-1} - I_q^{\text{исп}}, I_0 = I_0. \quad (14)$$

4. На фазовые переменные и переменные управления накладываются следующие ограничения:  $B_q \geq 0$ ,  $I_q \geq 0$ ,  $I_0 \geq 0$  и  $I_q \leq I_0$ .

5. Целевая функция зависит от типа применяемой на каждом шаге оптимизации операции агрегирования и имеет вид:

$$F_q(\mathbf{p}_{q-1}) = \begin{cases} (1 - w_q(\mathbf{v}_q)) \cdot F_{q+1}(\mathbf{p}_q), & \text{при послед, агрегировании;} \\ \max((1 - w_q(\mathbf{v}_q)), F_{q+1}(\mathbf{p}_q)), & \text{при парал, агрегировании,} \end{cases} \quad (15)$$

где  $w_q$  - эффективность агрегируемого на шаге  $q$  рубежа защиты при заданных ограничениях на используемые ресурсы  $\mathbf{v}_q$ .

6. Параметры. Состояние системы на шаге 0 определяется заданным ограничением на ресурсы и равно  $\mathbf{p}_0 = (B_0, I_0, I_0)$ .



Решение задачи ДП выполняется в три этапа: условная оптимизация, затем для заданного ограничения на финансовые ресурсы выбирается значение полной ИЛТ, дающее наименьшее значение риска, и выполняется абсолютная оптимизация.

**В четвертой главе** предлагаются алгоритм поиска на графе последовательности операций агрегирования и алгоритм оптимизации методом ДП, полученный на его основе, исследуются свойства разработанных алгоритмов, выполняется оценка временной и емкостной сложности, рассматриваются особенности результата работы алгоритма оптимизации.

Алгоритм поиска последовательности операций агрегирования, представленный на рисунке 2, основан на рекуррентной процедуре SEARCH, реализующей поиск последовательности операций агрегирования для вершины. Алгоритм реализует «стягивание» последовательно соединенных дуг в текущую вершину, выполняя процедуру последовательного агрегирования SERIAL, и выполняет процедуру параллельного агрегирования PARALLEL в точках соединения параллельных дуг. В работе доказываются свойства конечности, дискретности и массовости алгоритма.

Для решения задачи оптимизации в рассмотренном алгоритме в функции параллельного и последовательного агрегирования вводятся процедуры вычисления риска. Для этого вводятся дополнительные структуры данных для хранения результата условной оптимизации и модифицируются функции агрегирования SERIAL и PARALLEL, при выполнении которых вычисляется условный риск для каждого рубежа. В работе приводятся структуры данных, используемые в программной реализации алгоритма оптимизации. Программная реализация алгоритма оптимизации «Analyzer» представляет собой консольное приложение Windows, разработанное на языке Visual C++.

В главе проведен сравнительный анализ предложенного алгоритма оптимизации и алгоритма оптимизации методом прямого перебора по показателям временной и емкостной сложности. Анализ показал, что временная сложность предложенного алгоритма слабо зависит от количества опций, в то время как алгоритм прямого перебора имеет экспоненциальную зависимость. В то же время емкостная сложность предложенного алгоритма, в отличие от алгоритма прямого перебора, экспоненциально зависит от длины вектора ФП.

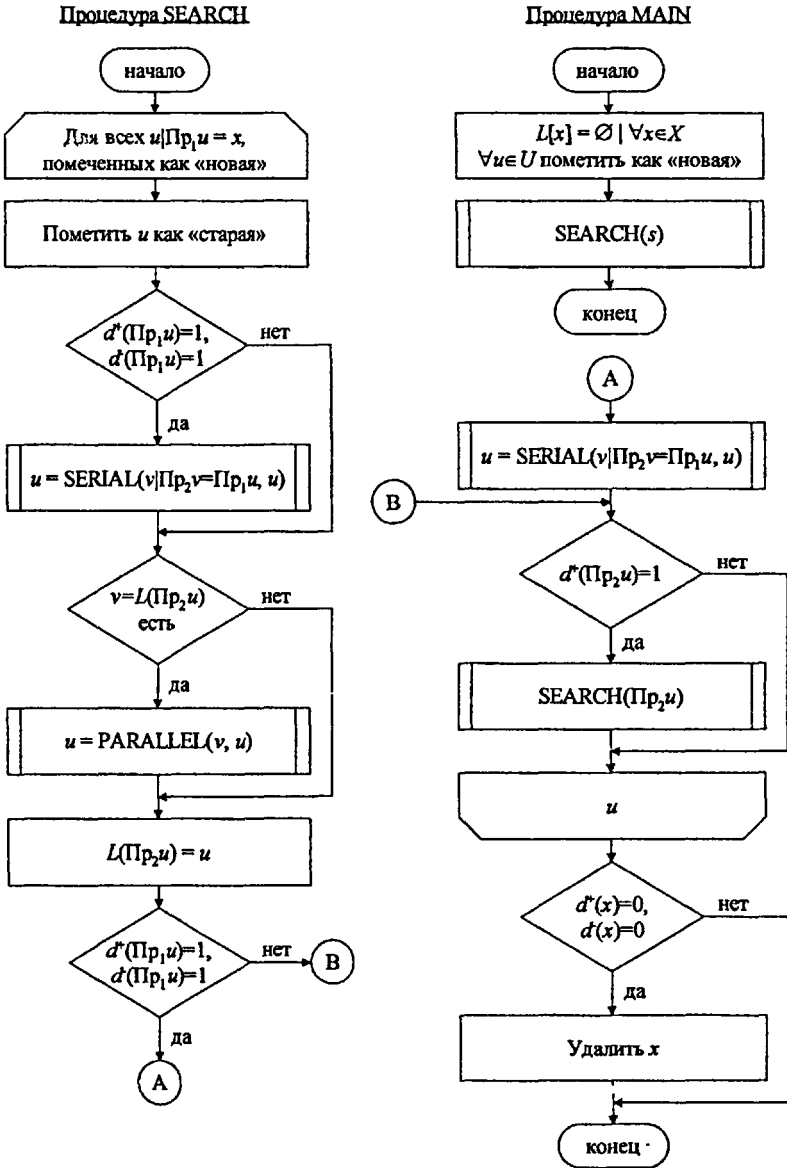


Рисунок 2

Проведен анализ результатов решения задачи оптимизации и установлено, что предложенный алгоритм позволяет выявлять «бессмысленные» опции, а также выполнять оптимизацию с учетом взаимного влияния параметров рубежей защиты, входящих в СФЗ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Приложения** содержат перечень принятых сокращений, список терминов и определений, листинг программы, а также акт, подтверждающий внедрение результатов работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией на основе сети с кратными дугами, что позволяет получить интегральный показатель эффективности без применения операции редукции.

2. Предложены интегральные функционально-стоимостные показатели эффективности систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией, обеспечивающие выполнение оптимизации с учетом принципов равнопрочности и адекватности защиты.

3. Получены функциональные зависимости интегральных показателей эффективности систем физической защиты от параметров ее подсистем, позволяющие обобщить способ количественной оценки эффективности для сложно структурированных систем защиты.

4. Предложены операции параллельного и последовательного агрегирования на модели систем физической защиты с использованием преобразований на взвешенных графах, позволяющие формализовать процесс распределения ресурсов при решении задачи оптимизации.

5. Разработан алгоритм поиска последовательности эквивалентных преобразований, приводящих исходную модель к трехэлементной модели, что позволяет применить для решения задачи оптимизации методы динамического программирования.

6. Решена задача оптимизации систем физической защиты особо важных объектов со сложной топологией методом динамического программирования. Предложенный способ обеспечивает выполнение оптимизации на всем пространстве возможных вариантов реализации системы при заданных ограничениях на используемые ресурсы с учетом топологии и взаимного влияния подсистем, тем самым значительно снижается влияние субъективного фактора на результаты оптимизации.

7. Разработаны алгоритм решения задачи оптимизации СФЗ методом динамического программирования и его программная реализация «Analyzer», что дает возможность автоматизировать процесс выбора оптимального варианта построения СФЗ на этапе разработки концептуального проекта, существенно снизить время проектирования и влияние субъективных факторов.

Результаты работы могут применяться к решению задач анализа и оптимизации систем информационной безопасности, систем контроля доступа и других технических систем.

**Основные положения диссертации изложены  
в следующих публикациях:**

1. Быстров С. Ю. Анализ и синтез комплексов средств охраны // Синтез и сложность управляющих систем: Материалы XII Международ. школы-семинара. - М.: Изд. центр прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2001. — Ч. 1. — С. 63-67.

2. Быстров С. Ю. Формализованное описание структур системы охраны // Вычислительные системы и технологии обработки информации: Межвуз. сб. науч. статей.- Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. - Выпуск 1 (27). - С. 82-92.

3. Быстров С. Ю. Модель интегрированной системы безопасности и ее количественная оценка // Новые информационные технологии: Сб. тр. VI Всерос. науч.-техн. конф. В 2-х т. Т.1 / Под общ. ред. А. П. Хныкина. - М.: МГАПИ, 2003. - С. 100-106.

4. Быстров С. Ю. Математическое описание комплекса средств охраны / С. Ю. Быстров, П. П. Макарычев // Новые информационные

технологии и системы: Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2000. - С. 148.

5. Быстров С.Ю. Анализ комплекса средств охраны на основе ориентированного графа / С. Ю. Быстров, П. П. Макарьчев, К. И. Шестаков // Технические средства охраны, комплексы охранной сигнализации и системы управления доступом: Тез. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. - С. 48-50.

6. Быстров С. Ю. Базовая модель системы безопасности // Технические средства охраны, комплексы охранной сигнализации и системы управления доступом: Тез. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. - Заречный - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2002. - С.56-59.

7. Быстров С. Ю. Система управления доступом и охранной сигнализации «Цирконий-С» - ядро АСФЗ объектов: структура, особенности, интеграция с другими системами / К. И. Шестаков, С. Ю. Быстров // Технические средства охраны, комплексы охранной сигнализации и системы управления доступом: Тез. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. - С. 51-52.

8. Быстров С. Ю. Интегрированная система «Цирконий - С2000»: состав, структура, функциональные характеристики / К. И. Шестаков, С. Ю. Быстров, Д. И. Первушкин // Технические средства охраны, комплексы охранной сигнализации и системы управления доступом: Тез. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2002. - С. 96-98.

9. Быстров С. Ю. Оценка эффективности систем физической защиты в условиях неопределенности // Научно-технический журнал «Системный анализ, обработка информации и новые технологии». - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2003. - № 10. - С. 37-40.

10. Быстров С. Ю. Проблемы анализа и оптимального синтеза систем физической защиты // Научно-технический журнал «Системный анализ, обработка информации и новые технологии». - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2003. - № 10. - С. 40-44.

**БЫСТРОВ Сергей Юрьевич**

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ  
ОСОЮ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.01 — Системный анализ, управление  
и обработка информации

**Редактор С. В. Сватковская**

Технический редактор *Н. А. Вьялкова*

**Корректор Я. А. Сидельникова**

Компьютерная верстка *М. Б. Жучковой*

Сдано в производство 24.02.04. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.

Заказ № 136. Тираж 100.

---

Издательство Пензенского государственного университета.

440026, Пенза, Красная, 40

Отпечатано в типографии ПГУ



**# - 75 18**