

МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА КЛАССОВ ЗАЩИЩЕННОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗ ДАННЫХ ПО ОБЪЕКТАМ

Быков А.Ю.¹, Панфилов Ф.А.², Зенькович С.А.³

В статье сформулированы содержательная и математическая постановки задач назначения классов защищенностей для объектов распределенной информационной системы и распределения баз данных по объектам с учетом уровня конфиденциальности данных, эти две задачи предложено решать совместно. Для выбора введены два показателя качества: показатель доступности данных для пользователей и показатель стоимости. Решения ищутся среди множества Парето, рассмотрены три подхода: подход на основе взвешенных критериев, поиск всех решений множества Парето с помощью неполного перебора, поиск решения на основе сведения задачи к игре с противоположными интересами. При использовании подхода на основе взвешенных критериев решались несколько задач дискретной оптимизации при варьировании весами показателей. При поиске решения методом неполного перебора выполнялся перебор решений с отсечением решений, для которых не выполняются ограничения. Подход, основанный на сведении задачи к игре, требует решения двух задач дискретной оптимизации. Точные алгоритмы с полиномиальной временной сложностью для решения подобных задач оптимизации неизвестны. Для снижения размерности задачи предложен способ снижения размерности, заключающийся в том, что решается отдельно задача распределения данных по объектам, а для решения задачи назначения классов защищенности предложен алгоритм с полиномиальной временной сложностью, доказано, что алгоритм дает точное решение. Представлены результаты решения задачи и тестирования алгоритмов. Результаты показали, что подход, основанный на взвешенных критериях, не позволяет получать все точки множества Парето, а подход, основанный на сведении задачи к игре, позволяет получать одно решение множества Парето, данное решение может быть получено методом взвешенных критериев при назначении показателю доступности максимального веса.

Ключевые слова: информационная безопасность, распределенная информационная система, многокритериальный выбор, множество Парето, дискретное программирование, игра с противоположными интересами, положение равновесия по Нэшу

Введение

При проектировании распределенных информационных систем (РИС), в том числе, основанных на «облачных» технологиях, возникает задача определения классов защищенности для объектов РИС и распределения баз данных (БД) по этим объектам с целью повышения защищенности хранимых данных. Подобная постановка с одним показателем качества рассмотрена в [1], но большинство задач выбора на практике являются многокритериальными. Рассмотрим некоторые примеры применения многокритериального выбора для решения задач, связанных с защитой информации.

В [2] рассматривается применение многокритериального выбора при принятии решения при защите от DDoS-атак в WSNs (Wireless Sensor

Networks – беспроводные сенсорные сети). В качестве критериев выбора были использованы частота обнаружения атаки и скорость затухания энергии. Был проведен анализ возможности применения нечеткой логики для решения задачи, но в итоге был выбран метод целевого программирования.

В [3] рассматриваются алгоритмы управления рисками информационной безопасности с использованием методики PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations). Метод PROMETHEE направлен на решение мультикритериальных задач, приведенных к стандартному матричному виду (матрица критерий-альтернатива), метод требует задания относительного веса каждого критерия, а также функции предпочтения одной альтернативы над другой

1 Быков Александр Юрьевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры ИУ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, abykov@bmstu.ru

2 Панфилов Филипп Александрович, ассистент ИУ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, ponf@inbox.ru

3 Зенькович Станислав Александрович, ассистент ИУ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, zsa@bmstu.ru

альтернативой по каждому критерию. Для отображения альтернатив графически была использована плоскость GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance), на плоскости альтернативы отображаются в виде точек, а критерии в виде векторов. Проведены проверки чувствительности алгоритмов.

В [4] рассматриваются проблемы облачных вычислений. Для минимизации рисков безопасности авторы рекомендуют задействовать систему обнаружения вторжений (IDS). В данной статье предлагается использовать многокритериальный метод для анализа и сравнения нескольких архитектур IDS для последующего применения. Первоначально вводится множество показателей для оценивания IDS, каждому показателю назначается вес с использованием подхода к многокритериальному выбору MacBeth (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique).

В [5] предложен подход для обнаружения внутренних атак в WSNs. Обнаружение атак проводится в два этапа с использованием многокритериального выбора. На первом этапе выделяется подозрительный узел с помощью ABIM (Abnormal Behavior Identification Mechanism – механизма идентификации нестандартного поведения). На втором этапе происходит сбор доказательств и принятие конечного решения с помощью теории Демпестера-Шафера (DST), в основе этой теории находятся две функции: функция доверия (belief functions) и функция правдоподобия (plausible reasoning).

В [6] изложен подход для определения целостности данных (доверия к ним), получаемых с различных датчиков. В качестве основы подхода лежит многокритериальный выбор принятия решения на основе взвешенного интеграла Шоке (Choquet Integral). В качестве показателей могут быть использованы различные параметры, например, конфиденциальность, чувствительность, надежность и т.п.

В [7] рассматривается проблема предсказания DDoS-атаки на SDN-сети (Software-Defined Networking – программно-определяемая или программно-конфигурируемая сеть). После проведенного анализа архитектуры SDN было предложено анализировать данные в реальном времени с использованием параметров двух трафиков: нормального трафика и трафика при проведении DDoS-атаки. Обнаружение атак производится с помощью многокритериального выбора, при этом используется нечеткая логика совместно с четкими ограничениями.

В [8] предлагается использовать многокритериальный выбор для создания энергоэффективных маршрутов между устройствами в WSNs. Для решения проблемы многокритериальности строится гибридное виртуальное потенциальное поле, которое включает в себя следующие показатели: коммуникационное расстояние, длину очереди и остаточную энергию каждого узла. Благодаря предложенному методу удается продлить срок службы автономной работы устройств и снизить процент потери пакетов.

В [9] предлагается использовать многокритериальный метод принятия решения для определения ближайшего узла в одноранговой сети P2P. В работе совместно используются АНР (Analytic Hierarchy Process – метод анализа иерархий) и GRA (Grey Relation Analysis – серый реляционный анализ). С помощью метода анализа иерархий определяются веса показателей, а с помощью GRA определяется окончательная альтернатива.

В [10] предложен способ защиты сетей WSNs от атаки DDoS на основе многокритериального метода. Предлагается использовать нечеткую логику. Задача обнаружения атаки формулируется как задача многокритериального выбора, в качестве показателей используются: скорость обнаружения атаки и скорость затухания сигнала. Для достижения наилучшего компромисса между двумя показателями используются нечеткие операторы Дюбуа (Dubois) и Прейда (Prade).

В [11] рассмотрены риски информационной безопасности при воздействии различных угроз на ресурсы системы. Риск интерпретируется как оценка возможного ущерба с учетом вероятностей успешной реализации угроз. Все риски сводятся в одну целевую функцию, ставится задача линейного программирования, связанная с распределением ресурсов по элементам облачной системы.

В [12] предложен способ формализации процесса оценки уязвимости объекта информатизации. Для построения агрегированного показателя уровня уязвимости объекта используется линейная свертка локальных показателей различных уязвимостей. Для оценки важности различных уязвимостей рассматриваются методы экспертного оценивания.

В [13] рассматривается задача распределения облачных сервисов между физическими машинами, задача ставится как многокритериальная задача булева программирования. При оптимизации используются критерии: минимум энергопотребления, минимум неиспользованных ресур-

сов, неравномерность тепловыделения и др. Для нахождения Парето-оптимального решения используется метод последовательных уступок.

1. Постановка задачи

Рассмотрим содержательную постановку задачи назначения объектам классов защищенности и распределения БД по объектам. Постановка задачи аналогичная постановке в [1], но отличается используемыми показателями и некоторыми исходными параметрами модели. В РИС существует множество объектов. Объектами могут быть отдельные сервера, центры обработки данных. Внутри объекта может быть своя локальная сеть, а также могут быть использованы различные облачные технологии. В этой системе могут храниться конфиденциальные данные различной степени конфиденциальности. Для обеспечения необходимого уровня защищенности данных на объектах могут применяться различные технологии и средства защиты. Для хранения определенных типов данных могут предъявляться некоторые требования: это могут быть требования ФСТЭК, требования к хранению персональных данных и др. Таким образом, для хранения некоторых типов данных объект РИС должен удовлетворять требованиям заданного класса защищенности (в терминологии ФСТЭК). Похожий подход, основанный на том, что объекты облачной системы имеют разные уровни защищенности, был использован в [11] для распределения ресурсов защиты между объектами.

Обеспечение требований классов защищенности требует применения определенных технологий или средств защиты, т.е. требует материальных затрат. Множество классов защищенности задано в руководящих документах. Необходимо решить совместно две задачи: определить для каждого объекта РИС класс защищенности, требованиям которого должен удовлетворять объект РИС; распределить данные (БД) по объектам РИС. В качестве показателей, которые необходимо оптимизировать, будем использовать два показателя: стоимость создания системы защиты информации на объектах, удовлетворяющих выбранным классам защищенности; показатель доступности данных для потребителей в РИС.

Цель дальнейших исследований состоит в формулировке математической постановки задачи многокритериального выбора и в разработке подходов и алгоритмов ее решения. Перейдем к математической постановке задачи.

Исходные данные

Введем в рассмотрение следующие базисные множества:

– $S = \{S_i, i \in M\}$ – множество объектов РИС (серверов, центров обработки данных и т.п.), на которых могут храниться БД; $M = \{1, 2, \dots, m\}$ – множество индексов объектов РИС;

– $D = \{D_j, j \in N\}$ – множество БД (массивов данных), которые должны храниться в РИС; $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество индексов БД;

– $K = \{K_k, k \in L\}$ – множество классов защищенностей, требованиям которых должны удовлетворять объекты РИС; $L = \{1, 2, \dots, l\}$ – множество индексов классов защищенностей, будем полагать, что чем меньший индекс класса, тем больше требований по безопасности предъявляются.

Элементы множеств и отношения между ними характеризуются следующими параметрами:

– $c_k, \forall k \in L$ – стоимость создания объекта, удовлетворяющего требованиям k -го класса защищенности, при этом, чем более жесткие требования защищенности определены в классе, тем выше стоимость объекта, так как чем меньше индекс класса, тем больше требований по безопасности предъявляются, то есть $c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_k$;

– $v_j, \forall j \in N$ – верхняя оценка объема j -ой БД;

– $V_i, \forall i \in M$ – суммарный объем баз данных, который экономически целесообразно хранить на i -ом объекте;

– $d_{ij} \in [0, 1], \forall i \in M, j \in N$ – коэффициент, отражающий относительную потребность хранения данных j -ой БД на i -ом объекте исходя из запросов пользователей, чем больше запросов с i -го объекта к j -ой БД, тем больше данный коэффициент, таким образом, если j -ую БД разместить на i -ом объекте, то эти запросы будут обрабатываться быстрее и меньше вероятность различных сбоев, так как нет необходимости передавать данные по каналам связи;

– $B_{\langle n \times l \rangle}$ – булева матрица, отражающая необходимость хранения БД на объектах, которые удовлетворяют требованиям заданных классов защищенности исходя из степени конфиденциальности этих данных, элемент этой матрицы $b_{jk} = 1$, если данные j -ой БД (массива) могут храниться на объектах, которые удовлетворяют требованиям k -го класса защищенности, $b_{jk} = 0$ – в противном случае ($\forall j \in N, k \in L$).

Показатели качества

По аналогии с [1] для формализации задачи введем два вида булевых переменных. Пер-

вая группа булевых переменных: переменная $x_{ik}, i \in M, k \in L$, принимает значение, равное 1, если i -ый объект удовлетворяет требованиям k -го класса защищенности, и равное 0 – в противном случае. Обозначим через $\vec{X} = \|x_{11}, \dots, x_{1L}, x_{21}, \dots, x_{2L}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mL}\|^T$ вектор булевых переменных. Вторая группа булевых переменных: переменная $y_{ij}, i \in M, j \in N$, принимает значение, равное 1, если j -ая БД размещена на i -ом объекте, и равное 0 – в противном случае. Обозначим через $\vec{Y} = \|y_{11}, \dots, y_{1N}, y_{21}, \dots, y_{2N}, \dots, y_{m1}, \dots, y_{mN}\|^T$ вектор булевых переменных. Похожий вектор для описания распределения облачных сервисов между физическими машинами был использован в [13].

Показатель, характеризующий стоимость реализации на объектах РИС выбранных классов защищенностей имеет вид:

$$F_1(\vec{X}) = C(\vec{X}) = \sum_{i \in M} \sum_{k \in L} c_k x_{ik} \quad (1)$$

Значение показателя необходимо минимизировать.

Нормированный показатель доступности данных потребителям имеет вид (при условии, что БД хранится на объектах в одном экземпляре):

$$F_2(\vec{Y}) = D(\vec{Y}) = \frac{\sum_{j \in N} \sum_{i \in M} d_{ij} y_{ij}}{\sum_{j \in N} \max_{i \in M} d_{ij}} \quad (2)$$

Значение показателя необходимо максимизировать. Показатель принимает значение в интервале $[0, 1]$, значение 1 будет в том случае, если любая j -ая БД будет размещена только на одном i -ом объекте с максимальным коэффициентом потребности хранения для этой БД.

Ограничения

На значения компонент вектора \vec{X} наложены ограничения:

$$\sum_{k \in L} x_{ik} = 1, \forall i \in M, \quad (3)$$

выражающее условие того, что i -ый объект обязательно удовлетворяет требованиям одного класса защищенности.

На значения компонент вектора \vec{Y} наложены ограничения:

$$\sum_{i \in M} y_{ij} = 1, \forall j \in N, \quad (4)$$

выражающее условие того, что j -ая БД должна обязательно храниться на объектах РИС в одном экземпляре.

Замечание. В ограничении (4) вместо знака равенства может присутствовать знак « \geq », т.е. j -ая

БД должна обязательно храниться на объектах РИС, как минимум, в одном экземпляре, что повышает доступность и другие характеристики данных с точки зрения их безопасности, но усложняет процесс администрирования, поэтому на данном этапе это обстоятельство учитывать не будем.

Ограничения на объем данных, который экономически целесообразно хранить на i -ом объекте:

$$\sum_{j \in N} v_j y_{ij} \leq V_i, \forall i \in M. \quad (5)$$

Ограничения на то, что БД должна храниться на объекте, который удовлетворяет классу защищенности не ниже заданного:

$$\sum_{i \in M} \sum_{k \in L} b_{jk} x_{ik} y_{ij} \geq 1, \forall j \in N. \quad (6)$$

Поставленная задача выбора классов защищенностей для объектов РИС и распределения БД между объектами является двухкритериальной задачей булева программирования с показателями качества (1) и (2) и ограничениями (3)-(6), задача является нелинейной, так как присутствуют нелинейные ограничения вида (6).

2. Методы решения задачи

Для решения таких задач можно использовать методы многокритериального выбора [14, 18-21], обычно решение ищется среди решений множества Парето. Существует множество алгоритмов решения многокритериальных задач, как правило, большинство из этих методов предполагают решение задачи с одним показателем качества один или несколько раз. В случае решения задачи с одним показателем качества необходимо решать задачу булева программирования с ограничениями (3)-(6) и одним суммарным вектором неизвестных булевых переменных, состоящим из компонент векторов \vec{X} и \vec{Y} , при этом, как правило, задача будет большой размерности и точных алгоритмов с полиномиальной трудоемкостью для нее неизвестны. Рассмотрим один из методов получения решений из множества Парето, получивший название – метода взвешенных критериев (иногда метод называют методом параметризации множества Парето) [14].

2.1. Метод взвешенных критериев

В первую очередь все показатели необходимо нормализовать, т.е. привести к единой безразмерной шкале измерений. Показатель (2) уже нормализован. Показатель (1) нормализуем следующим образом:

$$F_1^{(H)}(\vec{X}) = \frac{(C_{max} - C(\vec{X}))}{(C_{max} - C_{min})} = \frac{(C_{max} - \sum_{i \in M} \sum_{k \in L} c_k x_{ik})}{(C_{max} - C_{min})}, \quad (7)$$

где $C_{max} = \max_{\vec{X}} C(\vec{X})$, $C_{min} = \min_{\vec{X}} C(\vec{X})$ – максимальное и минимальное значения стоимости. При такой нормировке показатель необходимо максимизировать, значения показателя принадлежат интервалу $[0, 1]$.

Суть метода заключается в следующем. Вводится свертка показателей (обобщенный показатель):

$$F_{об}(\vec{X}, \vec{Y}) = \alpha_1 F_1^{(H)}(\vec{X}) + \alpha_2 F_2(\vec{Y}), \quad (8)$$

где α_1, α_2 – весовые коэффициенты показателей, удовлетворяющие условиям: $\alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Для поиска решения из множества Парето необходимо решить задачу максимизации обобщенного показателя:

$$F_{об}(\vec{X}, \vec{Y}) \rightarrow \max_{\vec{X}, \vec{Y} \in \Delta_{доп}},$$

где $\Delta_{доп}$ – множество допустимых альтернатив, заданное системой ограничений (3)–(6). Для решения задачи необходимо решить задачу булевого программирования с суммарным вектором неизвестных переменных, включающим вектора \vec{X}, \vec{Y} .

Варьируя значения весов показателей α_1, α_2 можно получать различные точки множества Парето. Для обоснования этого приведем без доказательства следующую теорему [14].

Теорема 1. Решается задача максимизации p нормированных частных показателей $F^{(i)}(\vec{X}), i=1, \dots, p$. Пусть \vec{X}^* является решением следующей оптимизационной задачи

$$\sum_{i=1}^p \alpha_i F^{(i)}(\vec{X}) \rightarrow \max_{\vec{X} \in \Delta_{доп}},$$

где $\alpha_i > 0$ – веса показателей, удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^p \alpha_i = 1$. Тогда вектор \vec{X}^* оптимален по Парето.

Замечание. Если веса показателей α_i не равны 0, то гарантируется получение решений множества Парето, при равенстве некоторых весов 0, если существует несколько решений оптимизационной задачи, то среди этих решений существует решение (или решения), которое принадлежат множеству Парето.

Основные недостатки метода:

- метод не гарантирует получения всех точек множества Парето при варьировании весами показателей;

- приходится решать задачу булевого программирования, как правило, большой размерности с суммарным вектором неизвестных переменных, включающим вектора \vec{X}, \vec{Y} ;

- задача является нелинейной, так как присутствуют ограничения (6).

2.2. Поиск точек множества Парето на основе методов неполного перебора

Кроме метода полного перебора, который является самым неэффективным по временной сложности методом, для решения задач булевого (дискретного) программирования существуют методы неполного перебора, например, методы перебора решений на решетке или на дереве [15]. Эти методы при переборе отсекают часть решений, которые заведомо не допустимы по ограничениям или заведомо не оптимальны. Например, при решении поставленной задачи достаточно просто организовать перебор решений таким образом, чтобы выполнялись ограничения (3) для вектора \vec{X} или ограничения (4) для вектора \vec{Y} , достаточно обеспечить, чтобы в каждой группе из нескольких компонент была одна 1, остальные элементы 0. Также при переборе можно отсекают некоторые решения, для которых не выполняются ограничения (5) для вектора \vec{Y} (если на объекте нельзя разместить оставшиеся БД из-за ограничений на рекомендуемый объем хранения данных, то данные варианты размещения можно не рассматривать). Достоинство перебора всех допустимых по ограничениям решений заключается в том, что можно найти все точки множества Парето. Для этого организуется список найденных решений множества Парето, первоначально список пуст. Рассмотрим правило включения в список или исключения из списка допустимого решения.

Правило 1 (Получения множества Парето переборным алгоритмом). На каждом шаге переборного алгоритма проверяемое допустимое решение сравнивается со всеми решениями, включенными в список множества Парето, при этом возможны следующие ситуации:

- если список пуст, то решение включается в список, содержащий найденные решения множества Парето;

- если среди решений списка множества Парето нет решений, которые доминируют найденное решение или нет решения с одинаковыми значениями показателей, как у проверяемого, то проверяемое решение включается в список, при этом, возможно, некоторые решения удаляются из списка, если они доминируются найденным решением;

- в противном случае, проверяемое решение не включается в список множества Парето.

Неполный перебор все равно имеет экспонен-

циальную временную сложность, остается проблема большой размерности задачи, так как решением является вектор, включающий в себя вектора \vec{X}, \vec{Y} . Кроме того, нелинейные ограничения вида (6) усложняют перебор. Рассмотрим подход, который позволяет сократить размерность задачи, а также избавиться от нелинейных ограничений вида (6). Сформулируем следующую теорему.

Теорема 2. Для каждой БД в соответствии с матрицей $B_{<n \times l>}$ определим максимальный индекс класса (класс с минимальными требованиями по безопасности), на котором можно хранить БД, $Kl_j^{(max)}, \forall j \in N$. Для любого заданного вектора решений вектора \vec{Y} , который удовлетворяет ограничениям (4) и (5), чтобы найти оптимальный по показателю (1) вектор \vec{X} , удовлетворяющий ограничениям (3) и (6), достаточно каждому i -му объекту, $\forall i \in M$ назначить класс с минимальным индексом – $\min_{j \in N_i} Kl_j^{(max)}$ (класс с большими требованиями по безопасности), где $N_i \subseteq N$ – множество индексов БД, размещенных на i -ом объекте в соответствии с вектором решений \vec{Y} .

Например, если на объекте размещены БД с индексами 1, 3, 5, при этом БД с индексом 1 должна быть размещена на объекте, который удовлетворяет 3-му классу защищенности или выше (классу с меньшим индексом), БД с индексом 3 должна быть размещена на объекте, который удовлетворяет 2-му классу защищенности или выше, БД с индексом 5 должна быть размещена на объекте, который удовлетворяет 2-му классу защищенности или выше, тогда объекту необходимо назначить 2-ой класс защищенности.

Доказательство. Очевидно, что если назначить объекту класс защищенности с минимальным индексом – $\min_{j \in N_i} Kl_j^{(max)}$, требования которого должны быть выполнены для хранения БД, размещенных на объекте, то будет обеспечено выполнение ограничений (6). В соответствии с ограничениями (6) класс защищенности с большим индексом (с меньшим числом требования по безопасности) назначать нельзя, можно только назначить класс с меньшим индексом (если такой существует). Но так как, чем меньше индекс класса, тем больше стоимость реализации требований этого класса, то назначать класс с меньшим индексом объекту не оптимально по стоимости. Таким образом, класс с минимальным индексом $\min_{j \in N_i} Kl_j^{(max)}, \forall i \in M$, назначенный каждому объекту, будет оптимальным по стоимости.

Очевидно, что если для каждого объекта определять класс защищенности по правилу, определенному в теореме 2, то в худшем случае времен-

ная сложность метода ограничена $O(nml)$ (на каждом шаге для каждого объекта проверяется класс защищенности, определенный для каждой БД), т.е. временная сложность полиномиальная.

Используя результаты теоремы, можно организовать следующий переборный алгоритм для нахождения всех точек множества Парето. Перебираем допустимые по ограничениям (4), (5) вектора \vec{Y} , для каждого \vec{Y} , используя результаты теоремы 1, находим оптимальный по показателю (1) вектор \vec{X} так, чтобы выполнялись ограничения (3) и (6). Для найденного допустимого решения (пары векторов \vec{X}, \vec{Y}) определяем, включать его в список множества Парето или не включать, используя правило 1.

2.3. Метод получения решения на основе сведения задачи к игре двух игроков с непротивоположными интересами

Задачу можно также трактовать как задачу 2-х игроков с непротивоположными интересами [16]: один игрок отвечает за выбор вектора \vec{X} , а второй за выбор вектора \vec{Y} . При этом показатели игроков независимые (каждый показатель зависит только от решение своего игрока), но множество допустимых альтернатив определяется совместной системой ограничений (3)-(6), при этом совместными (наложены на решения двоих игроков) являются только ограничения (6). Связи многокритериальных и игровых задач рассмотрены в [17]. При игровом подходе к поставленной задаче обычно ищется состояние равновесия по Нэшу [16, 17]. При этом не всегда положение равновесия по Нэшу принадлежит множеству Парето [17] (положение равновесия по Нэшу при решении игры в чистых стратегиях не всегда существует).

В случае независимых показателей и совместных ограничений на решения игроков положение равновесия по Нэшу можно определить так. Обозначим Δ_{XY} – множество допустимых векторов \vec{X} и \vec{Y} , т.е. векторов, удовлетворяющих ограничениям (3)-(6), тогда решением, которое удовлетворяет критерию равновесия Нэша, является пара векторов $\langle \vec{X}^*, \vec{Y}^* \rangle, \vec{X}^*, \vec{Y}^* \in \Delta_{XY}$, таких, что выполняются условия (в случае, если первый показатель необходимо минимизировать, а второй максимизировать):

$$F_1(\vec{X}^*) \leq F_1(\vec{X}), \forall \vec{X} \in \Delta_{XY} \text{ при } \vec{Y} = \vec{Y}^*;$$

$$F_2(\vec{Y}^*) \geq F_2(\vec{Y}), \forall \vec{Y} \in \Delta_{XY} \text{ при } \vec{X} = \vec{X}^*.$$

Для нахождения решения удовлетворяющего критерию равновесия по Нэшу рассмотрим следующий алгоритм. Похожий по последовательности

шагов алгоритм применялся в [17] для непрерывного случая, в [1] похожий алгоритм применялся для случая одного показателя, зависящего от выбора каждого из игроков.

Алгоритм поиска состояния равновесия по Нэшу

Шаг 0. Задаем значения компонент вектора \vec{X}_0 так, чтобы каждый объект РИС удовлетворял требованиям наивысшего класса защищенности информации (самое неоптимальное решение по показателю (1)). Для этого решения можно исключить ограничение (6), так БД по требованиям безопасности можно размещать на любом объекте.

Шаг 1. При заданном векторе \vec{X}_0 , находим вектор \vec{Y}_1 решая задачу булевого программирования некоторым методом дискретной оптимизации с показателем качества (2) и ограничениями (4), (5).

Шаг 2. При заданном векторе \vec{Y}_1 , находим вектор \vec{X}_1 , решая задачу булевого программирования с показателем качества (1) и ограничениями (3) и (6), при этом можно воспользоваться для решения результатами теоремы 2. Работа алгоритма завершена.

Замечание. Если на шаге 1 получено несколько решений с одним и тем же значением показателем качества, то для каждого из этих решений на шаге 2 необходимо решить задачу поиска оптимального вектора \vec{X} и выбрать пару векторов \vec{X}_1 и \vec{Y}_1 с минимальным значением показателя стоимости (1).

Теорема 3. Полученное алгоритмом решение (вектора \vec{X}_1 и \vec{Y}_1) определяет равновесную ситуацию по Нэшу, также это решение является оптимальным по Парето. Кроме того, это же решение можно получить методом взвешенных критериев, если назначить вес показателя доступности – 1.0.

Доказательство. Для компонент вектора \vec{Y}_1 , которые определяются на первом шаге алгоритма при самых благоприятных значениях со стороны вектора \vec{X}_0 (для второго игрока), очевидно, что $F_2(\vec{Y}_1) \geq F_2(\vec{Y}), \forall \vec{Y} \in \Delta_{XY}$ при $\vec{X} = \vec{X}_0$. Решив оптимизационную задачу на втором шаге алгоритма, также очевидно, что будет выполняться условие $F_1(\vec{X}_1) \leq F_1(\vec{X}), \forall \vec{X} \in \Delta_{XY}$ при $\vec{Y} = \vec{Y}_1$. Докажем, что $F_2(\vec{Y}_1) \geq F_2(\vec{Y}), \forall \vec{Y} \in \Delta_{XY}$ при $\vec{X} = \vec{X}_1$. Так как на первом шаге получено $F_2(\vec{Y}_1) \geq F_2(\vec{Y}), \forall \vec{Y} \in \Delta_{XY}$ при $\vec{X} = \vec{X}_0$, а условие $\vec{X} = \vec{X}_0$ означает, что снимаются ограничения (6), т.е. БД, исходя из требований безопасности, могут быть размещены на любом объекте. При изменении условия на $\vec{X} = \vec{X}_1$ появляются дополнительные ограничения (6), при решении оптимизационной задачи, если вводятся дополнительные ограничения, то значение показателя не может быть улучшено,

следовательно, $F_2(\vec{Y}_1) \geq F_2(\vec{Y}), \forall \vec{Y} \in \Delta_{XY}$ при $\vec{X} = \vec{X}_1$. Таким образом, решение (\vec{X}_1, \vec{Y}_1) является точкой равновесия по Нэшу.

Докажем, что решение (\vec{X}_1, \vec{Y}_1) принадлежит множеству Парето. Допустим, что решение (\vec{X}_1, \vec{Y}_1) не принадлежит множеству Парето, тогда $\exists \vec{X}, \vec{Y} \in \Delta_{XY} (F_2(\vec{Y}) > F_2(\vec{Y}_1) \wedge F_1(\vec{X}) \leq F_1(\vec{X}_1)) \vee (F_2(\vec{Y}) \geq F_2(\vec{Y}_1) \wedge F_1(\vec{X}) < F_1(\vec{X}_1))$ (должно выполняться одно из двух условий). Так как на шаге 1 решается задача оптимизации при снятии ограничений (6), т.е. решение \vec{Y}_1 не зависит от значений \vec{X} , то $\nexists \vec{Y}, F_2(\vec{Y}) > F_2(\vec{Y}_1), \forall \vec{X}$, таким образом, первое условие $(F_2(\vec{Y}) > F_2(\vec{Y}_1) \wedge F_1(\vec{X}) \leq F_1(\vec{X}_1))$ всегда ложное. Второе условие может быть только таким $(F_2(\vec{Y}) = F_2(\vec{Y}_1) \wedge F_1(\vec{X}) < F_1(\vec{X}_1))$, но в соответствии с замечанием к алгоритму в случае нескольких решений \vec{Y} с одинаковым значением показателя (2), выбирается решение с минимальным значением показателя (1), следовательно, $\nexists \vec{X}, (F_2(\vec{Y}) = F_2(\vec{Y}_1) \wedge F_1(\vec{X}) < F_1(\vec{X}_1))$.

При использовании метода взвешенных критериев, если показателю доступности назначить вес со значением 1.0, тогда показатель стоимости будет иметь вес – 0.0 Фактически будет решаться задача оптимизации показателя (2), показатель (1) может принимать любые значения. Максимальное значение показателя (2) может быть достигнуто, если снять совместные ограничения вида (6), что выполнено на первом шаге алгоритма. Поэтому среди решений при оптимизации по обобщенному показателю (8) будут решения, полученные на шаге 1 алгоритма.

3. Эксперименты

Рассмотрим пример решения задачи с заданными исходными данными, а также эксперименты, когда исходные данные генерируются с помощью генераторов псевдослучайных чисел.

3.1. Пример решения задачи

Рассмотрим пример решения задачи для информационной системы со следующими исходными данными: число объектов – 6, число классов защищенностей – 3, число распределяемых БД – 12. Стоимости создания объектов в условных единицах (у.е.), удовлетворяющих требованиям классов защищенностей представлены в табл. 1, параметры объектов (экономически целесообразный объем БД для хранения на объекте в у.е.) представлены в табл. 2, параметры баз данных

представлены в табл. 3. Коэффициенты, отражающие потребности хранения данных на объектах представлены в табл. 4.

Таблица 2.

Параметры объектов

| Номер объекта | Экономически целесообразный объем БД для хранения на объекте, у.е. |
|---------------|--|
| 1 | 25 |
| 2 | 25 |
| 3 | 30 |
| 4 | 50 |
| 5 | 50 |
| 6 | 50 |

Таблица 1.

Параметры классов защищенностей

| Номер класса | Стоимость создания объекта, у.е. |
|--------------|----------------------------------|
| 1 | 1 000 000 |
| 2 | 800 000 |
| 3 | 500 000 |

Таблица 3.

Параметры баз данных

| Номер БД | Нижний класс защищенности объекта, на котором может храниться БД | Оценка верхнего объема БД, у.е. |
|----------|--|---------------------------------|
| 1 | 1 | 10 |
| 2 | 1 | 10 |
| 3 | 1 | 15 |
| 4 | 2 | 15 |
| 5 | 2 | 20 |
| 6 | 2 | 20 |
| 7 | 2 | 20 |
| 8 | 3 | 20 |
| 9 | 3 | 25 |
| 10 | 3 | 25 |
| 11 | 3 | 25 |
| 12 | 3 | 25 |

Таблица 4.

Коэффициенты, отражающие потребности хранения данных на объектах ($d_{ij}, \forall i \in M, j \in N$)

| Номер БД | Номера объектов | | | | | |
|----------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 1,0 | 0,9 | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,1 |
| 2 | 1,0 | 0,9 | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,1 |
| 3 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,2 |
| 4 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,4 |
| 5 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,4 |
| 6 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,6 |
| 7 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 |
| 8 | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 |
| 9 | 0,4 | 0,8 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 10 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 1,0 |
| 11 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,2 | 1,0 |
| 12 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,1 | 1,0 |

Модель и методы многокритериального выбора классов защищенности ...

При решении задачи с исходными данными, представленными в табл. 1-4. Были использованы все три подхода:

- метод взвешенных критериев (значение весов показателей варьировались в интервале от 0.0 до 1.0 с шагом 0.1 в соответствии с замечанием к теореме 1 для гарантированного получения решения из множества Парето вместо пары весов, содержащих значение 0 и 1, использовались значения 0.01 и 0.99), для решения задачи с одним показателем качества был использован метод неполного перебора для поиска вектора \vec{Y} , для поиска вектора \vec{X} были использованы результаты теоремы 2;

- метод поиска всех точек множества Парето с помощью метода неполного перебора для поиска вектора \vec{Y} , для поиска вектора \vec{X} были использованы результаты теоремы 2;

- метод сведения задачи и игре, для поиска

вектора \vec{Y} на соответствующем шаге алгоритма был использован метод неполного перебора.

Для данных исходных данных при использовании трех подходов был получен один и тот же результат (множество Парето состоит из одной точки). В табл. 5 представлены выбранные классы защищенностей для объектов и размещенные на них БД.

Значение показателя стоимости для представленного в табл. 5 решения - 4500000,00, значения показателя доступности данных - 0,773.

3.2. Эксперименты, связанные с генерацией исходных данных генераторами псевдослучайных чисел.

В результате экспериментов с исходными данными, формируемыми с помощью генераторов псевдослучайных чисел, для разных вариантов исходных данных выполнены следующие действия:

Таблица 5.

Выбранные классы защищенностей для объектов и номера БД, размещенных на объектах

| Номер объекта | Номер класса для объекта | Номера БД, размещенные на объекте |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 3 | 10 |
| 2 | 3 | 9 |
| 3 | 1 | 2, 8 |
| 4 | 1 | 3, 4, 6 |
| 5 | 1 | 5, 7 |
| 6 | 3 | 11, 12 |

Таблица 6.

Результаты экспериментов при получении исходных данных генератора псевдослучайных чисел

| № п/п | Исходные данные, определяющие размерность задачи (n, m, l) | Число решений множества Парето, полученных методом взвешенных критериев | Общее число решений множества Парето, полученных методом неполного перебора | Минимальное значения веса показателя доступности, при котором решение идентично решению игровой задачи |
|-------|--|---|---|--|
| | 13, 6, 3 | 5 | 11 | 0.95 |
| | | 2 | 3 | 0.90 |
| | 12, 6, 6 | 6 | 13 | 1.00 |
| | | 4 | 8 | 0.95 |
| | 12, 6, 5 | 5 | 10 | 0.99 |
| | | 6 | 9 | 0.99 |
| | 12, 6, 4 | 5 | 5 | 0.99 |
| | | 6 | 7 | 0.99 |
| | 12, 6, 3 | 4 | 6 | 0.99 |
| | | 2 | 2 | 0.80 |
| | 10, 5, 3 | 4 | 7 | 0.99 |
| | | 3 | 3 | 0.95 |
| | 8, 4, 3 | 3 | 4 | 0.95 |
| | | 3 | 4 | 0.80 |
| | 6, 3, 3 | 2 | 2 | 0.75 |
| | | 1 | 1 | 0.00 |

- для метода взвешенных критериев определены различные решения множества Парето, полученные при варьировании весов показателей;

- методом неполного перебора найдены все решения множества Парето;

- для метода, основанного на сведении задачи к игре, найдено решение, удовлетворяющее критерию равновесия по Нэшу и входящее в множество Парето, сравнением с результатами метода взвешенных критериев определены веса показателей, при которых получено такое же решение методом взвешенных критериев.

При использовании метода взвешенных критериев значения весов варьировались в интервале от 0.00 до 1.00 с шагом 0.05 (также проверялся вариант весов 0.01 и 0.99, чтобы обеспечить ненулевой вес для гарантированного получения решения из множества Парето). Результаты экспериментов представлены в табл. 6, в столбцах табл. 6 приведены: размерность исходных данных, число точек множества Парето, полученных методом взвешенных критериев, полное число точек множества Парето, которых получены методом неполного перебора, а также минимальное значение веса показателя доступности, при котором получено решение, одинаковое с решением, полученным при сведении задачи к игре.

Заключение

В статье рассмотрена постановка задачи выбора классов защищенностей для объектов РИС и распределения БД по объектам РИС в многокритериальной постановке с двумя показателями качества: стоимости и доступности. Для решения многокритериальной задачи рассмотрены три подхода:

- на основе взвешенных критериев, при данном подходе на каждом шаге необходимо решать

задачу дискретной оптимизации, подход позволяет получать некоторые решения из множества Парето, но не все;

- поиск всех решений множества Парето, основанный на неполном переборе, при этом для снижения размерности задачи предложено неполный перебор использовать только для подзадачи распределения БД по объектам, тем самым уменьшается размерность задачи, для решения задачи назначения классов защищенностей объектам предложен точный метод с полиномиальной трудоемкостью;

- сведение задач к игре двух игроков с противоположными интересами, при этом предложен метод нахождения решения, удовлетворяющего критерию равновесия Нэша, решение также принадлежит множеству Парето, при этом необходимо решить одну задачу дискретной оптимизации распределения БД по объектам, для назначения классов защищенностей был использован алгоритм с полиномиальной временной сложностью.

Практическое тестирование алгоритмов на исходных данных, полученных с помощью генераторов псевдослучайных чисел, показало следующее:

- при использовании подхода, основанного на взвешенных критериях, были получены не все решения множества Парето, процент полученных решений 45 – 100 %;

- при использовании подхода, основанного на сведении задачи к игре, было получено решение, удовлетворяющее критерию равновесия, это же решение входит во множество Парето, данное решение можно получить методом взвешенных критериев, если критерию доступность назначить максимальный вес – 1,00 или близкий к 1,00 (в некоторых случаях можно решение получено при меньшем значении веса).

Рецензент: Басараб Михаил Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор МГТУ им.Н.Э.Баумана, bmic@mail.ru

Литература:

1. Быков А.Ю., Панфилов Ф.А., Ховрина А.В. Алгоритм выбора классов защищенности для объектов распределенной информационной системы и размещения данных по объектам на основе приведения оптимизационной задачи к задаче теории игр с противоположными интересами // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 1. DOI: 10.7463/0116.0830972.
2. R.Y. AlOmary, S.A. Khan. Goal programming based multi-criteria decision-making for distributed denial of service attacks in wireless sensor networks // IEEE Conference Publications. 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA). 2013. P. 33-37. DOI: 10.1109/IC3INA.2013.6819144.
3. J.J. Lv, Y.S. Zhou, Y.Z. Wang. A Multi-criteria Evaluation Method of Information Security Controls // IEEE Conference Publications. 2011 Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO). 2011. P. 190-194. DOI: 10.1109/CSO.2011.43.
4. M. Zbakh, K. Elmahdi, R. Cherkaoui, S. Enniari. A multi-criteria analysis of intrusion detection architectures in cloud environments // IEEE Conference Publications. 2015 International Conference on Cloud Technologies and Applications (CloudTech). 2015. P. 1-9. DOI: 10.1109/CloudTech.2015.7336967.
5. M.R. Ahmed, X. Huang, H. Cui, N.K. Srinath. A novel two-stage Multi-criteria evaluation for internal attack in WSN // IEEE Conference Publications. 2013 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). 2013. P. 198–203. DOI: 10.1109/ISCIT.2013.6645849.

6. B. Stelte, A. Matheus. Secure trust reputation with multi-criteria decision making for wireless sensor networks data aggregation // IEEE Conference Publications. 2011 IEEE Sensors. 2011. P. 920-923. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6126929.
7. P. Van Trung, T. T. Huong, D. Van Tuyen, D. M. Duc, N. H. Thanh, A. Marshall. A multi-criteria-based DDoS-attack prevention solution using software defined networking // IEEE Conference Publications. 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). 2015. P. 308-313. DOI: 10.1109/ATC.2015.7388340.
8. Y. H. Suh, K. T. Kim, D. R. Shin, H. Y. Youn. Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor Network // IEEE Conference Publications. 2015 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS). 2015. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.
9. Y. Liu, X. Zhou, S. Ren, L. Yang, S. Ci. Peer selection in mobile P2P networks based on AHP and GRA // IEEE Conference Publications. 2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON). 2012. P. 179-184. DOI: 10.1109/ICON.2012.6506555.
10. R. Y. AlOmary, S. A. Khan. Fuzzy logic based multi-criteria decision-making using Dubois and Prade's operator for distributed denial of service attacks in wireless sensor networks // IEEE Conference Publications. 2014 5th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS). 2014. P. 1-6. DOI: 10.1109/IACS.2014.6841979.
11. Зикратов И.А., Одегов С.В., Смирных А.В. Оценка рисков информационной безопасности в облачных сервисах на основе линейного программирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1 (83). С. 141-144.
12. Носков С.В., Бутин А.А., Соколова Л.Е. Многокритериальная оценка уровня уязвимости объектов информатизации // Доклады ТУСУРа. Июнь 2014. № 2 (32). С. 137-142.
13. Ворожцов А.С., Тутова Н.В., Тутов А.В. Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №6. С. 4-8.
14. Карпенко А.П., Семенихин А.С., Митина Е.В. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. DOI: 10.7463/0412.0363023.
15. Быков А.Ю., Алтухов Н.О., Сосенко А.С. Задача выбора средств защиты информации в автоматизированных системах на основе модели антагонистической игры // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/708106.html> (дата обращения 24.03.2016).
16. Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. 327 с.
17. Стрекаловский А.С., Орлов А.В. Биматричные игры и билинейное программирование. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
18. Казарин О.В., Кондаков С.Е., Троицкий И.И. Подходы к количественной оценке защищенности ресурсов автоматизированных систем // Вопросы кибербезопасности. 2015. № 2 (10). С. 31-35.
19. Кондаков С.Е. Анализ и синтез комплекса средств защиты информации // Вопросы кибербезопасности. 2013. № 2. С. 20-24.
20. Оладько В.С. Модель выбора рационального состава средств защиты в системе электронной коммерции // Вопросы кибербезопасности. 2016. № 1 (14). С. 17-23.
21. Чобанян В.А., Шахалов И.Ю. Анализ и синтез требований к системам безопасности объектов критической информационной инфраструктуры // Вопросы кибербезопасности. 2013. № 1 (1). С. 17-27.

MODEL AND METHODS OF MULTI-CRITERIA SELECTION OF THE SECURITY CLASSES FOR OBJECTS IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM AND DATABASES PLACEMENT ON OBJECTS

Bykov A.Yu.⁴, Panfilov F.A.⁵, Zenkovich S.A.⁶

In the article meaningful and mathematical problem of assignment security classes for the objects in distributed information system and databases placement on objects according their confidentiality level were formulated, these two problems were suggested to solve together. For selection two quality scores were introduced: score of the availability of data for users and the score of the system cost. Solutions are searched among the Pareto set, three approaches were considered: approach based on weighted criteria, search all the Pareto set solutions by a partial brute force, search for solutions based on the reducing the problem to the game with non-conflicting interests. Using an approach based on weighted criteria several problems of discrete optimization by varying the weights of scores were solved. When searching for solutions by incomplete enumeration iterate solutions cutting off solutions for which no restrictions are met were performed. An approach based on reducing the problem to the game, requires solving of two problems of discrete optimization. Accurate algorithms with polynomial time complexity for solving such optimization problems are un-

4 Aleksandr Bykov, Associated Professor, Ph.D., Associated Professor at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, abykov@bmstu.ru

5 Filipp Panfilov, Assistant at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, ponf@inbox.ru

6 Stanislav Zenkovich, Assistant at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, zsa@bmstu.ru

known. To reduce the dimensionality of the problem a method of reducing the dimension, based on separately solving problem of data placement among the objects, and solving problem of proposing security classes with polynomial time complexity were provided, and it proved that the algorithm provides accurate solution. The results of solving the problem and algorithms tests are provided. The results showed that an approach based on weighted criteria does not allow all the points of the Pareto set, and an approach based on reducing the problem to the game, allows you to receive a single solution of Pareto set, this decision may be obtained by weighted criteria for the appointment the score of availability the maximum weight.

Keywords: information security, distributed information system, multi-criteria selection, Pareto set, discrete programming, game with non-conflicting interests, Nash equilibrium

References:

1. Bykov A.Yu., Panfilov F.A., Zenkovich S.A. Algoritm vybora klassov zashchishchennosti dlya ob'ektov raspredelennoj informacionnoj sistemy i razmeshcheniya dannyh po ob'ektam na osnove privedeniya optimizacionnoj zadachi k zadache teorii igr s neprotivopolozhnymi interesami [The Algorithm to Select Security Classes for Objects in Distributed Information Systems and Place Data in the Objects Through Reducing the Optimization Problem to the Theory of Games with Non-conflicting Interests]. Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education of the Bauman MSTU], 2016, No. 1. DOI: 10.7463/0116.0830972.
2. R.Y. AlOmary, S.A. Khan. Goal programming based multi-criteria decision-making for distributed denial of service attacks in wireless sensor networks. IEEE Conference Publications. 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), 2013, pp. 33-37. DOI: 10.1109/IC3INA.2013.6819144.
3. J.J. Lv, Y.S. Zhou, Y.Z. Wang. A Multi-criteria Evaluation Method of Information Security Controls. IEEE Conference Publications. 2011 Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO), 2011, pp. 190-194. DOI: 10.1109/CSO.2011.43.
4. M. Zbakh, K. Elmahdi, R. Cherkaoui, S. Enniari. A multi-criteria analysis of intrusion detection architectures in cloud environments. IEEE Conference Publications. 2015 International Conference on Cloud Technologies and Applications (CloudTech), 2015, pp. 1-9. DOI: 10.1109/CloudTech.2015.7336967.
5. M. R. Ahmed, X. Huang, H. Cui, N. K. Srinath. A novel two-stage Multi-criteria evaluation for internal attack in WSN. IEEE Conference Publications. 2013 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013, pp. 198-203. DOI: 10.1109/ISCIT.2013.6645849.
6. B. Stelte, A. Matheus. Secure trust reputation with multi-criteria decision making for wireless sensor networks data aggregation. IEEE Conference Publications. 2011 IEEE Sensors, 2011, pp. 920-923. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6126929.
7. P. Van Trung, T. T. Huong, D. Van Tuyen, D. M. Duc, N. H. Thanh, A. Marshall. A multi-criteria-based DDoS-attack prevention solution using software defined networking. IEEE Conference Publications. 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2015, pp. 308-313. DOI: 10.1109/ATC.2015.7388340.
8. Y. H. Suh, K. T. Kim, D. R. Shin, H. Y. Youn. Traffic-Aware Energy Efficient Routing (TEER) Using Multi-Criteria Decision Making for Wireless Sensor Network. IEEE Conference Publications. 2015 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICITCS.2015.7293029.
9. Y. Liu, X. Zhou, S. Ren, L. Yang, S. Ci. Peer selection in mobile P2P networks based on AHP and GRA. IEEE Conference Publications. 2012 18th IEEE International Conference on Networks (ICON), 2012, pp. 179-184. DOI: 10.1109/ICON.2012.6506555.
10. R. Y. AlOmary, S. A. Khan. Fuzzy logic based multi-criteria decision-making using Dubois and Prade's operator for distributed denial of service attacks in wireless sensor networks. IEEE Conference Publications. 2014 5th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 2014, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IACS.2014.6841979.
11. Zikratov I. A., Odegov S. V., Smirnyh A. V. Ocenka riskov informacionnoj bezopasnosti v oblachnyh servisah na osnove linejnogo programirovaniya. Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki, 2013, No. 1 (83), pp. 141-144.
12. Noskov S.V., Butin A.A., Sokolova L.E. Mnogokriterial'naja ocenka urovnja ujazvimosi ob'ektov informatizacii. Doklady TUSURa. Ijun' 2014, No 2 (32), pp. 137-142.
13. Vorozhcov A.S., Tutova N.V., Tutov A.V. Optimizacija razmeshhenija oblachnyh serverov v centrah obrabotki dannyh. T-Comm: Telekomunikacii i transport, 2015, Vol 9, No 6, pp. 4-8.
14. Karpenko A.P., Semehin A.S., Mitina E.V. Populyacionnye metody approksimacii mnozhestva Pareto v zadache mnogokriterial'noj optimizacii [Review: population methods of Pareto set approximation in multi-objective optimization problem]. Obzor. Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, No. 4. DOI: 10.7463/0412.0363023.
15. Bykov A.Yu., Altuhov N.O., Sosenko A.S. Zadacha vybora sredstv zashchity informacii v avtomatizirovannyh sistemah na osnove modeli antagonistscheskoj igry [The problem of choosing software / hardware means in automated information systems based on the model of an antagonistic game]. Inzhenernyj vestnik MGTU im. N.E. Baumana, 2014, No. 4. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/708106.html> (data obrashcheniya 24.03.2016).
16. Germejer Yu. B. Igry s neprotivopolozhnymi interesami. M.: Nauka, 1976, 327 p.
17. Strekalovskij A.S., Orlov A.V. Bimatrichnye igry i bilinejnoe programirovanie. M.: Fizmatlit, 2007, 224 p.
18. Kazarin O.V., Kondakov S.E., Troitskiy I.I. Podkhody k kolichestvennoj otsenke zashchishchennosti resursov avtomatizirovannykh system, Voprosy kiberbezopasnosti [Cybersecurity issues], 2015, No 2 (10), pp.31-35.
19. Kondakov S.E. Analiz i sintez kompleksa sredstv zashchity informatsii, Voprosy kiberbezopasnosti [Cybersecurity issues], 2013, No 2, pp.20-24.
20. Olad'ko V.S. Model' vybora ratsional'nogo sostava sredstv zashchity v sisteme elektronnoy kommertsii // Voprosy kiberbezopasnosti [Cybersecurity issues], 2016, No 1 (14), pp.17-23.
21. Chobanyan V.A., Shakhlov I.Yu. Analiz i sintez trebovaniy k sistemam bezopasnosti ob'ektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury, Voprosy kiberbezopasnosti [Cybersecurity issues], 2013, No 1 (1), pp.17-27.