

УДК 681.5.01.658

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ВЫБОРА¹

Статья поступила в редакцию 23.01.2014, в окончательном варианте 10.02.2014.

Кандырин Юрий Владимирович, кандидат технических наук, профессор, действительный член Российской академии надежности и Международной академии системных исследований, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: ywk@mail.ru

Сазонова Людмила Тимофеевна, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: SazonovaLT@mpei.ru

Шкурина Галина Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: shkurina.galina@bk.ru

Чивилев Алексей Дмитриевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; Волгоградский государственный технический университет, 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: 4ibis-88@mail.ru

В работе рассмотрены принципы создания упорядоченных структур альтернатив для справочных систем автоматизированного выбора, построенных на априорных критериальных расслоениях для функционально однородных множеств, скорость изменения альтернатив в которых существенно меньше скорости изменений показателей качества и требований по допустимости. В качестве процедур целеполагания предложено использовать неметрические критерии Парето и Слейтера. В таких априорно сформированных структурах альтернатив процедуру выбора предложено проводить не сразу на всем множестве, а начинать её с первых (оптимальных по Парето или Слейтеру) слоев проверкой лишь на допустимость. Это существенно проще, так как не нужно каждый раз выполнять множественных бинарных комбинаторных сравнений вариантов, чего требует критериальный анализ. Показано также, что в случае хранения исходного множества вариантов в виде линейных порядков можно использовать адаптивное априорное критериальное структурирование альтернатив для любых размерностей показателей качества, формируя из линейных порядков частичные порядки вариантов. Эта операция проводится с использованием фактор-множеств и позволяет адаптивно к решаемой задаче проводить критериальное структурирование альтернатив, отражающее цели лица, принимающего решение ЛПР. Окончательный выбор вариантов осуществляется проверкой на допустимость альтернатив по слоям в сформированных адаптивных критериальных структурах.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, структурирование альтернатив, расслоение по Парето, расслоение по Слейтеру, адаптивные структуры данных, фактор-множества, линейно упорядоченные варианты, частично упорядоченные альтернативы

MULTICRITERIA STRUCTURING OF ALTERNATIVES IN THE AUTOMIZED SYSTEMS OF CHOICE

Kandyrin Yuriy V., Ph.D. (Engineering), Professor, Real Member of the Russian Academy of Reliability and International Academy of System Researches, National Research University "Moscow Power Institute", 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: ywk@mail.ru

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части проекта 2586 задания № 2014/16.

Sazonova Lyudmila T., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Institute", 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: SazonovaLT@mpei.ru

Shkurina Galina L., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Volgograd State Technical University, 28 Lenin av., Volgograd, 400131, Russian Federation, e-mail: shkurina.galina@bk.ru

Chivilev Aleksey D., post-graduate student, National Research University "Moscow Power Institute", 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russian Federation; Volgograd State Technical University, 28 Lenin av., Volgograd, 400131, Russian Federation, e-mail: 4ibis-88@mail.ru

In work the principles of creation ordered structures of alternatives the help systems automated choice constructed on aprioristic criteria stratifications for functionally uniform sets, speed of change of alternatives in which are considered, it is significantly less than a speed changes indicators of quality and requirements for an admissibility. As procedures of a goal-setting it is offered to use Pareto and Sleyter's unmetric criteria. In such a priori created structures of alternatives, it is offered to carry out procedure of a choice not at once on all set, and to begin it with the first (optimum across Pareto or Sleytera) layers check only on admissibility. It is significantly simpler as it isn't required to carry out each time of multiple binary combinatory comparisons of options that demanded by the criteria analysis. It is shown also that in case of storage of an initial set of options in the form of linear orders, it is possible to use adaptive aprioristic criteria structuring alternatives of any dimensions of indicators of quality, forming of linear orders partial orders of options. This operation is performed with use of quotient sets and allows is adaptive to a solved task to carry out the criteria structuring alternatives reflecting the purposes of the person, making the decision. The final choice of options is carried out by check on admissibility of alternatives on layers in the created adaptive criteria structures.

Keywords: multicriteria choice, structuring alternatives, stratification across Pareto, stratification on Sleytera, adaptive structures of data, the quotient sets, linearly ordered options, partially ordered alternatives

Качество разрабатываемой электронной аппаратуры во многом зависит от рационального проектного выбора типовых и унифицированных компонентов, которые представлены в соответствующих каталогах и справочниках. Несмотря на одинаковое функциональное назначение, эти варианты компонентов могут отличаться некоторыми значениями характеристик и, с учетом принятых критериев выбора по совокупности показателей качества (ПК), приводить к лучшим, худшим или несравнимым решениям. Отсюда встает задача выбора оптимального (в том или ином смысле) варианта из однородного множества. Под однородным множеством здесь и далее будем понимать множество изделий (вариантов) одного функционального назначения, описываемое одним и тем же набором характеристик. Вопросы рационального построения систем автоматизированного многокритериального выбора альтернатив, разработки принципов их построения и их архитектуры являются важными и актуальными.

Цель работы состоит в описании разработанных авторами принципов и математических моделей создания упорядоченных структур альтернатив для справочных систем автоматизированного выбора, построенных на априорных критериальных расслоениях для функционально однородных множеств, скорость изменения альтернатив в которых существенно меньше скорости изменений ПК и требований по допустимости. В качестве процедур целеполагания предложено использовать неметрические критерии Парето и Слейтера и структуры адаптивного упорядочивания, которые можно по желанию ЛПР сформировать из линейных порядков вариантов по ПК, хранящихся в базе данных.

Решение задач выбора вариантов в автоматизированных справочных системах производится наиболее эффективно, если структуры данных, представляющие собой совокуп-

ность однородных альтернатив «настроены» на задачу выбора. Так, если задача выбора решается в соответствии с определенными целевыми установками, заданными тем или иным принципом оптимальности, то и структуры данных должны быть настроены на принятый ЛПР принцип оптимальности [1, 2, 3].

Адаптивное оптимальное упорядочивание вариантов в автоматизированной системе выбора дает основания для формирования структур информационных массивов, которые, будучи настроены на задачу, в значительной степени сократили бы «полный перебор» и свели бы число шагов, необходимых для выбора из исходного множества вариантов, к минимуму. При таком построении структуры данных поиск оптимального решения сразу же начинается с проверки на допустимость тех подмножеств, которые являются первыми претендентами на оптимальность.

Подобные технологии структурирования информации в базах данных являются эффективными, если скорость изменения множества исходных альтернатив много меньше, чем скорость изменения критериальных требований и требований по допустимости решений. Это позволяет, единожды осуществив критериальное упорядочивание вариантов, в дальнейшем решать каждую новую задачу только проверкой на допустимость потенциально оптимальных вариантов. Понятно, что это возможно в случае, если понимание ЛПР оптимальности сохраняется от задачи к задаче на принятом множестве, а изменяются только требования по допустимости. В таких задачах ПК привязаны к функциональному назначению вариантов из однородных множеств Ω .

Таким образом, предлагаемый подход основан на наделении исходного множества альтернатив (ИМА) структурой, связанной с функциональным назначением его элементов и отражающей устойчивые критериальные требования, присущие ИМА Ω . При этом целеполагание является прерогативой ЛПР, а его креативное участие как бы переносится с уровня собственно выбора альтернатив на выбор критериальных постановок задач выбора. Принятые цели определяют задаваемый вид структурирования Ω .

Рассмотрим последовательно возможные виды структурирования для неметрических π , S -постановок, строящихся на бинарных отношениях порядка.

1. Паретовское расслоение ИМА Ω . Послойное представление частично упорядоченного множества в виде последовательно задаваемых $\Omega_{\pi p}$ слоев означает, что процедура выбора на структурированном множестве должна начинаться сразу с потенциально эффективных (нехудших по π -критерию) конечных решений посредством проверки допустимости альтернатив по $C_d = \{=, <, >, \leq, \geq, \neq, \equiv\}$. Если допустимых вариантов в $\Omega_{\pi l}$ -решениях нет, то выбор проводится на следующем слое $\Omega_{\pi 2}$ частично упорядоченного множества ИМА Ω . Если их нет и там, то переходят к третьему слою и т.д. При этом $\Omega = \bigcup \Omega_{\pi p}$.

Таким образом, все исходное множество альтернатив Ω априорно разбивается на линейно упорядоченные $\Omega_{\pi p}$ слои, которые представляют собой настроенную на цели ЛПР эффективную структуру данных для решения задач выбора.

Слои Парето $\Omega_{\pi p}$ (или уровни соответствующей диаграммы Хассе [1]) определяются индуктивно. К первому слою относятся все $\Omega_{\pi 1}$ -оптимальные (концевые, недоминируемые) альтернативы $\Omega_{\pi 1} = \max \Omega / R_{\pi}$, найденные из условия

$$R_{\pi} : \{ [k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j)] \wedge [k_l(\omega_i) < k_l(\omega_j)] \}, i \neq j; \\ \{\omega_i, \omega_j\} \subseteq \Omega; \forall i, j = \{1, N\}; \forall l = \{1, M\}. \quad (1)$$

Второй слой в структуре исходного множества определяется как множество Парето – $\Omega_{\pi 2}$ на ИМА Ω , из которого удалены все элементы, принадлежащие первому паретовскому слою $\Omega_{\pi 1}$

$$\Omega_{\pi 2} = \pi(\Omega \setminus \Omega_{\pi 1}); \quad (2)$$

Аналогично для последующих слоев $\Omega_{\pi 3}, \Omega_{\pi 4}, \dots, \Omega_{\pi p}$:

$$\Omega_{\pi p} = \pi(\Omega \setminus \bigcup_{\square=1}^{s \square} \Omega_{\square \square}). \quad (3)$$

На рис. 1 показано расслоение ИМА Ω , для множества мощности $|\Omega| = 14$ по π_p -слоям в пространстве двух ПК k_1 и k_2 . В каждом $\Omega_{\pi p}$ -слое все элементы несравнимы между собой без привлечения дополнительной информации. Кроме того, каждый элемент $\Omega_{\pi p}$ -го подмножества линейно упорядоченных слоев принадлежит ровно одному классу подмножеств Парето расслоения ИМА Ω .

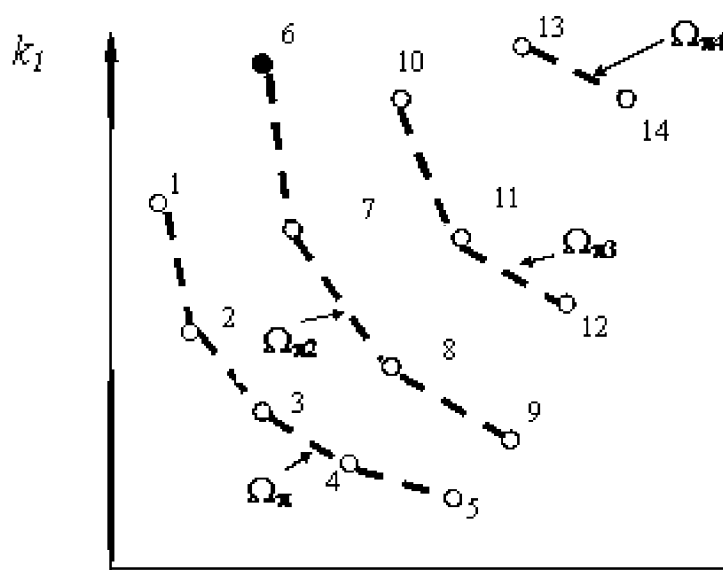


Рис. 1. Послойное представление частично упорядоченного множества, полученного на основании Парето расслоения по формуле (1)

Вопрос об оценке числа слоев при расслоении по Парето равносителен задаче об оценке минимального числа максимальных цепей, покрывающих граф частичного порядка на множестве Ω . Заметим, что линейно упорядоченное подмножество Ω / R_{π} множества Ω является максимальным (или максимальной цепью), если к нему нельзя добавить ни одного элемента из дополнения $\Omega \setminus (\Omega / R_{\pi})$, не нарушив свойства линейной упорядоченности слоёв. В графе частичного порядка, из которого удалены все транзитивно замыкающие дуги (диаграмма Хассе), таким подмножествам соответствуют максимальные цепи, замыкающие корневую и концевые вершины.

Таким образом, если в системе автоматизированного выбора альтернативы структурируются в соответствии с расслоениями по Парето, то это означает, что решение задачи выбора будет сведено к проверке ограничений на допустимость концевых (π -оптимальных) альтернатив по требованиям допустимости $C_d \Leftrightarrow \{=, <, >, \cong, \leq, \geq, \dots\}$ вначале в $\Omega_{\pi 1}$ -слое. Если $\Omega_{\pi 1} = \emptyset$, то переходят ко второму $\Omega_{\pi 2}$ -слою и т.д.

Не требует специального доказательства утверждение, что такая процедура выбора на заранее структурированном ИМА Ω существенно менее трудоемка, чем традиционный выбор по традиционным последовательным усечениям

$$\Omega \rightarrow \Omega_d \rightarrow \Omega_0,$$

так как для разных постановок выбор по требованиям допустимости C_d начинается сразу с возможно оптимальных вариантов $\Omega_{до}$.

Структура базы данных на физическом уровне, в случае её описания π -расслоениями, может быть представлена в виде линейного списка последовательными записями, каждая из которых является уникальным объединением альтернатив, входящих соответственно в первый, второй, третий, ..., π_p -слои $\langle \Omega_{\pi 1}, \Omega_{\pi 2}, \Omega_{\pi 3} \dots \rangle$. На рис. 2 представлена интерпретация множества Ω , изображенного на рис. 1 в виде линейного списка, каждое предложение, которого включает ровно один паретовский слой.

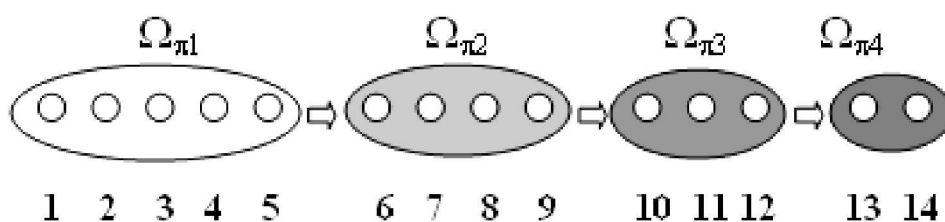


Рис. 2. Представление МВА Ω в виде структуры линейно упорядоченных слоев

Классификационная процедура декомпозиции множества возможных вариантов Ω может рассматриваться как способ аппроксимации частичного порядка линейным квазипорядком, задающим модель системы предпочтений ЛПР. Причем сама модель, представления в подобном виде, вводится для описания задач с *частично неопределенной* целью, в которых невозможно точное априорное определение линейного упорядочения альтернативных вариантов. В нашем случае – это задачи выбора с различными множественными постановками по допустимости C_d на одном π -упорядоченном однородном множестве.

Каждый элемент линейно упорядоченных альтернатив паретовского расслоения на ИМА Ω принадлежит ровно одному классу подмножеств $\bigcup_{\xi=1}^p \Omega_{\pi \xi}$.

Представление исходного множества в виде линейного списка значительно упрощает процедуру выбора, так как в первом предложении списка $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5\}$ (рис. 1) сгруппированы несравнимые варианты первого паретовского слоя, которые при выборе необходимо проверить только на допустимость по C_d .

ПРИМЕР 1. Пусть задана функция выбора $C = C_d \cup C_k$ на ИМА Ω . Пусть ЛПР принял в качестве априорного структурирования альтернатив расслоение по Парето по двум ПК $\pi\{k_1, k_2\}$.

Рассмотрим разбиение Ω на линейно упорядоченные подмножества $\langle \Omega_{\pi 1}, \Omega_{\pi 2}, \dots, \Omega_{\pi l}, \dots, \Omega_{\pi L} \rangle$, где каждое подмножество $\Omega_{\pi p}$, $p = \{1, L\}$ объединяет несравнимые по Парето элементы l -го слоя, а $\Omega_{\pi 1} \cup \Omega_{\pi 2} \cup \dots \cup \Omega_{\pi l} \cup \dots \cup \Omega_{\pi L} = \Omega$.

Если все элементы первого $\Omega_{\pi l}$ непустого слоя допустимы, решением задачи выбора $\langle C, \Omega \rangle$ будет $\Omega^0(C)$, где $\Omega^0_1(C): (\Omega_{\pi 1} \cap \Omega_d = \Omega_{\pi 1}^0) \wedge (\Omega_{\pi 1}^0 = \Omega_{\pi 1} \neq \emptyset)$.

Если решение пусто, т.е. $\Omega_{\pi 1}^0 \neq \emptyset$, то переходят к проверке на допустимость второго паретовского слоя $\Omega^0_2(C): (\Omega_{\pi 2} \cap \Omega_d = \Omega_{\pi 2}^0) \wedge (\Omega_{\pi 2}^0 = \Omega_{\pi 2} \neq \emptyset)$.

Если решение пусто $\Omega_{\pi 2}^0 \neq \emptyset$, то переходят к проверке на допустимость третьего паретовского слоя и т.д.

В случае пустых решений по $\Omega_{\pi 1}, \Omega_{\pi 2}, \dots, \Omega_{\pi p}, \dots, \Omega_{\pi(L-1)}$ слоям, вплоть до $(L-1)$ -го слоя, проверку на допустимость проводят на последнем L -слое $\Omega^0_L(C): (\Omega_{\pi L} \cap \Omega_d = \Omega_{\pi L}^0) \wedge (\Omega_{\pi L}^0 = \Omega_{\pi L} \neq \emptyset)$.

ПРИМЕР 2. Рассмотрим в качестве примера множество возможных альтернатив $\Omega = \{\omega_i\}$, $i = \{1, 14\}$, представленное на рис. 1 для двух ПК $k_1 \times k_2$. Пусть принцип оптимальности задан в виде $C = \{\pi \{k_1 \downarrow, k_2 \downarrow\} \cup C_d\}$, а допустимыми вариантами являются $\Omega(C_d) = \{\omega_6, \omega_7, \omega_{10}, \omega_{11}\}$.

Расслоение множества Ω в соответствии с критерием Парето $C_k = \pi \{k_1 \downarrow, k_2 \downarrow\}$ можно представить линейным порядком слоев $\langle \Omega_{\pi 1}, \Omega_{\pi 2}, \Omega_{\pi 3}, \Omega_{\pi 4} \rangle$. Согласно рис. 1, Ω содержит, соответственно, следующие варианты в паретовских подмножествах:

$$\begin{aligned}\Omega_{\pi 1} &= \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5\}, \\ \Omega_{\pi 2} &= \{\omega_6, \omega_7, \omega_8, \omega_9\}, \\ \Omega_{\pi 3} &= \{\omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{12}\}, \\ \Omega_{\pi 4} &= \{\omega_{13}, \omega_{14}\}.\end{aligned}$$

Если оптимальные варианты по принятому принципу оптимальности $C = C_d \cup C_k$ будем искать начиная с первого слоя, то проверка на допустимость даст следующий результат $\Omega_1^0(C): \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5\} \cap \Omega_d = \{\omega_6, \omega_7, \omega_{10}, \omega_{11}\}\} = \emptyset$.

Отсюда решение задачи $\langle C, \Omega \rangle$ не содержится в первом слое Парето и необходимо включить в рассмотрение второй паретовский слой, для которого $\Omega_2^0(C): \{\Omega_{\pi 2} = \{\omega_6, \omega_7, \omega_8, \omega_9\} \cap \Omega_d = \{\omega_6, \omega_7, \omega_{10}, \omega_{11}\}\} = \{\omega_6, \omega_7\}$.

В этом случае $\Omega^0(C) = \Omega_2^0(C)$ и оптимальными вариантами являются альтернативы $\{\omega_6, \omega_7\}$.

Итак, преимуществом послойного представления Ω/R_k является высокая эффективность поиска в линейно упорядоченном разбиении ИМА Ω по π -слоям $\{\Omega_{\pi l}, l = 1, L\}$ и быстрый поиск альтернатив, являющихся допустимыми элементами в $\Omega_{\pi l}$.

2. Слейтеровское структурирование альтернатив. Послойное представление частично упорядоченного множества в виде последовательно задаваемых S_p -слоев по Слейтеру означает, что процедура выбора на S -структурированном множестве должна начинаться также сразу с потенциально эффективных (оптимальных по S -критерию) конечных решений посредством проверки допустимости альтернатив по C_d . Если допустимых вариантов в Ω_{S1} -решениях нет, то выбор проводится на следующем Ω_{S2} слое S -упорядоченного множества Ω . Если их нет и там, то переходят к третьему слою и т.д.

Таким образом, все исходное множество альтернатив Ω априорно разбивается на линейно упорядоченные Ω_{Sp} слои, которые представляют структуру упорядоченных альтернатив для решения задач в соответствии с S -критерием.

S -слой: Ω_{Sp} (или уровни соответствующей диаграммы Хассе) определяются, как и в случае критерия Парето, индуктивно.

К первому слою относятся все Ω_{S1} -оптимальные (концевые, недоминируемые) альтернативы $\Omega_{S1} = \min \Omega / R_S$, найденные из условия

$$R_S: \min k_l(\omega_l) \{ \forall l = \{1, M\}, \forall i \neq j = \{1, N\}, [k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j) / \omega_i \succ = \omega_j] \}. \quad (4)$$

Второй слой в структуре Ω определяется как S -множество – Ω_{S2} на ИМА Ω , из которого удалены все элементы, принадлежащие первому S -слою Ω_{S1}

$$\Omega_{S2} = S(\Omega \setminus \Omega_{S1}). \quad (5)$$

Аналогично получим для последующих слоев $\Omega_{S3}, \Omega_{S4}, \dots, \Omega_{Sp}$

$$\Omega_{Sp} = S(\Omega \setminus \bigcup_{p=1}^{(p-1)} \Omega_{Sp}). \quad (6)$$

На рис. 3 представлено расслоение множества ИМА по Слейтеру, на основе которого осуществляется S -структурирование. Из рис. 3. видно, что для S -критерия, более слабого, чем π -критерий, число альтернатив в первом S -слое больше, чем число альтернатив в первом π -слое, а число слоев для S -критерия соответственно меньше, чем в π -расслоении. Расслоение по Слейтеру приводит к более «мягкому» структурированию, так же как и сам критерий

Слейтера приводит к более осторожной процедуре усечения вариантов по сравнению с критерием Парето.

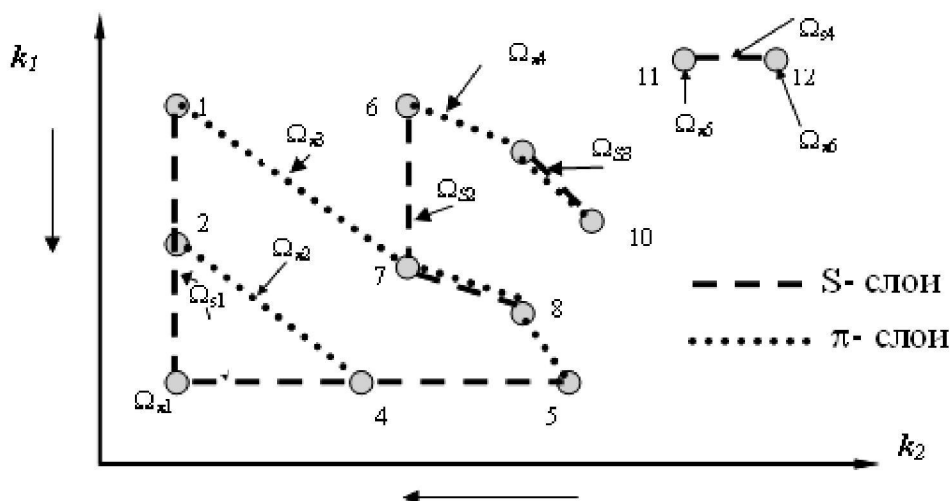


Рис. 3. Слейтеровское и паретовское расслоения ИМА Ω (для min)

Линейные порядки классов альтернатив при априорном структурировании по Слейтеру (а) и Парето (б) представлены на рис. 4 соответственно.

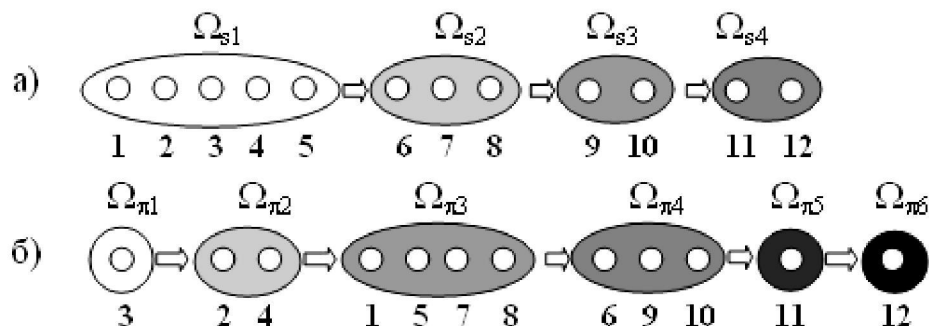


Рис. 4. Сравнение линейных порядков классов для слейтеровского (а) и паретовского (б) расслоений

Выбор типа (S- или π -) структурирования предполагает проведение предварительного анализа устойчивости решений, например по методикам, изложенным в [1, 4, 5]. В случае существенно неустойчивых решений, целесообразно проводить S-структурирование, приводящее к меньшему числу слоев, но позволяющее не отбросить возможные оптимальные решения при более глубоком анализе. Если же оценка устойчивости критериальной постановки дает положительные результаты, то целесообразно проведение более жесткого Парето структурирования. При этом наибольшую силу принцип оптимальности по Парето имеет при числе ПК $m = 2$.

3. Адаптивные структуры данных. В данной работе авторами предлагается компромиссный, адаптивный путь решения задач критериального структурирования Ω . Предположим, что практическая задача выбора является задачей с множеством ПК, любой из которых может присутствовать в целевой постановке разных задач выбора на данном исходном множестве. Поскольку ПК определяют онтологию структурирования альтернатив, то пред-

лагается хранить данные в виде линейных порядков по каждому из возможных показателей качества в виде совокупности таких порядков. Из этих исходных линейных структур могут быть сформированы совокупности окрестностей каждой альтернативы, а значит и фактор-множества для них. В свою очередь из фактор-множеств можно сформировать частичные порядки, задающие приоритеты в соответствии с диаграммой Хассе, концевые элементы которой являются недоминируемыми вариантами, оптимальными по Парето.

Поясним некоторые термины. Под *окрестностью* альтернативы $O_i(\Omega/k_l)$ будем понимать совокупность всех доминирующих или эквивалентных ей альтернатив. В свою очередь, совокупность окрестностей представляет собой *фактор-множество* Φ_Ω/k_l , той или иной размерности, в зависимости от числа ПК, для которого оно формируется.

Так для некоторого линейного порядка вариантов

$$L(\Omega/k_l): \langle \omega_5, \omega_3, \{\omega_4, \omega_6\}, \{\omega_1, \omega_2\} \rangle$$

фактор-множество будет состоять из следующих окрестностей альтернатив:

$$\Phi_\Omega/k_l = \{O_1(\Omega/k_l), O_2(\Omega/k_l), O_3(\Omega/k_l), O_4(\Omega/k_l), O_5(\Omega/k_l), O_6(\Omega/k_l)\},$$

где $O_1(\Omega/k_l) = \{\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6\}$ – окрестность ω_1 ; $O_2(\Omega/k_l) = \{\omega_1, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6\}$ – окрестность ω_2 ; $O_3(\Omega/k_l) = \{\omega_5, \omega_6\}$ – окрестность ω_3 ; $O_4(\Omega/k_l) = \{\omega_3, \omega_5, \omega_6\}$ – окрестность ω_4 ; $O_5(\Omega/k_l) = \emptyset$ – окрестность ω_5 ; $O_6(\Omega/k_l) = \{\omega_3, \omega_4, \omega_5\}$ – окрестность ω_6 .

Ранее в [1] было доказано, что решением задачи выбора в π - и L -постановках является пересечение фактор-множеств окрестностей альтернатив для соответствующей постановки. То есть в нашем случае решением для L -постановки будет выражение $\Omega_{l0} = O_i(\Omega/k_l) = \emptyset$, приводящее к оптимальной альтернативе ω_5 , окрестностью которой является пустое множество.

Аналогично для всех возможных совокупностей окрестностей может быть восстановлено результирующее фактор-множество на основе фактор-множеств меньшей размерности. Соответственно, из фактор-множеств первого порядка могут быть сформированы фактор-множества второго порядка (для любых пар ПК) посредством пересечения соответствующих окрестностей альтернатив.

При этом решение задачи выбора в постановке более высокой размерности $\pi(\Omega/\{k_1, \dots, k_l\})$ определяется пересечением окрестностей O_i для элементов ω_i фактор-множеств $\Phi_\Omega/k_1 \dots \Phi_\Omega/k_l$:

$$O_i(\Omega/k_1) \wedge O_i(\Omega/k_2) \wedge \dots \wedge O_i(\Omega/k_l) = \{\omega_j : [k_1(\omega_j) \leq k_1(\omega_i)] \wedge [k_l(\omega_j) < k_l(\omega_i)], \omega_{j,i,z} \subseteq \Omega\} \wedge \{\omega_p : [k_2(\omega_p) \leq k_2(\omega_i)] \wedge [k_2(\omega_\gamma) < k_2(\omega_i)], \omega_{p,i,\gamma} \subseteq \Omega\} \wedge \dots \wedge \{\omega_q : [k_l(\omega_q) \leq k_l(\omega_i)] \wedge [k_l(\omega_v) < k_l(\omega_i)], \omega_{q,i,v} \subseteq \Omega\}.$$

$$\text{Или более компактно для } l \subseteq M \text{ получим } \bigcap O_i(\Omega/k_l) = \bigcap \{\omega_j : [k_l(\omega_j) \leq k_l(\omega_i)] \wedge [k_l(\omega_s) < k_l(\omega_i)], \forall l \subseteq M, \omega_{j,i,s} \subseteq \Omega\}.$$

Таким образом, результирующие частично упорядоченные множества большей размерности, чем исходные для совокупности ПК $\{k_l\}$, $l = \{1, M\}$, могут быть получены пересечением фактор-множеств линейных и/или частичных порядков альтернатив меньшей размерности по l . Или иначе, каждое последующее по иерархии фактор-множество $\Phi(\Omega/\{k_{l+1}\})$ находится пересечением фактор-множеств более низкого порядка, а нехудшие варианты находятся как элементы, имеющие в своих окрестностях пустое множество $\emptyset$.

Соответственно для двух ПК $\Phi(\Omega/\{k_1, k_2\}) = \Phi(\Omega/\{k_1\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2\})$.

Для трех ПК

$$\Phi(\Omega/\{k_1, k_2, k_3\}) = \Phi(\Omega/\{k_1, k_2\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_1, k_3\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2, k_3\}). \quad (8)$$

Если раскрыть последнее выражение:

$$\Phi(\Omega/\{k_1, k_2, k_3\}) = \Phi(\Omega/\{k_1, k_2\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_1, k_3\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2, k_3\}) = \Phi(\Omega/\{k_1\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_3\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_1\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_3\}),$$

использовать переместительный закон, а также учесть, что

$$\Phi(\Omega/\{k_i\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_i\}) = \Phi(\Omega/\{k_i\}),$$

то получаем:

$$\Phi(\Omega/\{k_1\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_2\}) \cap \Phi(\Omega/\{k_3\}).$$

Таким образом, принципиально не требуется получать «вторичные» окрестности, а, имея лишь линейные порядки первого уровня, можно решать задачу многокритериального выбора для любых сочетаний ПК, в отношении которых имеется информация о линейных порядках, поскольку именно они несут в себе всю необходимую информацию для дальнейших решений.

Выражение (8) описывает то обстоятельство, что каждое последующее (в смысле размерности) фактор-множество может быть восстановлено по «проекциям» критериальных подпространств – например, $(k_1 \times k_2)$, $(k_2 \times k_3)$, $(k_1 \times k_3)$. Причем фактор-множества более высоких порядков можно сформировать из фактор-множеств более низких порядков, в том числе и непосредственно из предшествующих им по размерности.

Из (8) следует также, что фактор-множество для результирующей совокупности ПК будет содержать минимальные элементы, соответствующие минимальным элементам для проекций. Или это можно трактовать иначе: решения по более слабым постановкам содержат в себе решения по более сильным постановкам. Поэтому для уменьшения трудоемкости реализации алгоритма, осуществляющего пересечения окрестностей O_i с целью выявления минимальных элементов, поиск целесообразно начинать с тех окрестностей, которые содержат либо пустые множества, либо минимальные кортежи альтернатив. Такой подход позволяет снизить в целом трудоемкость алгоритмов адаптивного априорного структурирования альтернатив.

Алгоритм является адаптивным по отношению к каждой новой задаче, так как позволяет «настраивать» структуры альтернатив на каждую новую задачу выбора в понимании целей ЛПР через хранящиеся линейные порядки.

Таким образом, задача критериального адаптивного априорного структурирования альтернатив как бы приспособливает структуры данных к их целевому использованию при решении задач выбора. Само преобразование структур осуществляется в соответствии с рассмотренными выше правилами и может быть представлено следующей последовательностью.

На 0-ом уровне хранятся в качестве исходных структур нестрогие транзитивные линейные порядки вариантов по отдельным характеристикам, которые в зависимости от постановки задачи могут быть, в том числе и показателями качества. Этот набор данных обозначим: $\{L(\Omega/k_l)\}$.

Структуры данных 0-го уровня могут быть преобразованы, в случае необходимости при новой постановке задачи в структуры 1-го уровня. Эти структуры данных в случае устойчивости постановок могут быть использованы для априорного структурирования при решении различных задач выбора по допустимости.

На 1-ом уровне осуществляется хранение совокупности окрестностей транзитивных фактор-множеств $\{\Phi_{\Omega}^T/k_l\}$ по отдельным показателям качества.

Структуры 1-го уровня, в свою очередь, могут быть трансформированы посредством пересечения окрестностей в результирующие структуры 2-го уровня. И далее, по индукции – в структуры еще более высоких уровней, соответствующие более высоким частичным порядкам или более слабым постановкам задач.

Вывод. Задача многокритериального выбора вариантов по совокупности ПК из однородных множеств (типа электронных справочников, каталогов) должна решаться в структурах данных, которые отражают целеполагание ЛПР. Рассмотренные в статье методы априорного структурирования в соответствии с неметрическими критериями Парето, Слейтера или с помощью адаптивных критериев позволяют проводить однократное целевое упорядо-

чивание альтернатив, а выбор в разных частных задачах осуществлять лишь посредством проверки на допустимость вариантов из оптимальных слоев. При этом априорное адаптивное структурирование альтернатив позволяет сформировать любые линейные или частичные порядки вариантов, настраивающие структуры данных на задачу выбора – это позволяет значительно сократить трудоемкость решения задачи.

Список литературы

1. Кандырин Ю. В. Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пос. для вузов / Ю. В. Кандырин. – Москва : Издательство МЭИ, 2004. – 172 с.
2. Кандырин Ю. В. Два подхода к структурированию альтернатив / Ю. В. Кандырин, Г. Л. Шкурина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 107–110.
3. Мельник В. Ю., Камаев В. А., Кизим А. В. Применение неметрического метода Парето для задачи планирования технического обслуживания и ремонта / В. Ю. Мельник, В. А. Камаев, А. В. Кизим // Известия ВолГТУ. Проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2011. – Т. 11, № 12. – С. 103–106.
4. Молодцов О. А. Устойчивость принципов оптимизации / О. А. Молодцов, В. В. Федоров // Современное состояние теории исследования операций. – Москва : Наука, 1979. – С. 236–263.
5. Подиновский В. В. Анализ устойчивости результатов выбора при частичном отношении предпочтения / В. В. Подиновский // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 4. – С. 45–52. – ISSN 2071-8594.
6. Тиори Т. Проектирование структур баз данных : в 2 кн. / Т. Тиори, Дж. Фрай. – Москва : Мир, 1985.
7. Шкурина Г. Л. Использование процедур выбора для построения очередей ремонта оборудования / Г. Л. Шкурина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 3 (73). – С. 74–78.
8. Kandyrin Y. W. Interaktive und automatische Recherche von Invormationen für den Konstrukteur / Y. W. Kandyrin, G. Rörs // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technische Universität Dresden. – 1984. – Н. 2, № 33. – S. 147–151.
9. Levitin A. Introduction to the Design & Analysis of Algorithms / A. Levitin, V. Anany. – M. : Vilyams, 2006. – P. 1296. – ISBN 0-07-013151-1.
10. Tanino N. Stability of nondominated solutions in multicriteria decision-making / N. Tanino, Y. Sawaragi // J. Opt. Theory and Appl. – 1980. – Vol. 30, № 2. – P. 229–253.

References

1. Kandyrin Yu. V. *Metody i modeli mnogokriterialnogo vybora variantov v SAPR* [Methods and models of a multicriteria choice of options in SAPR]. Moscow, Moscow Power Institute Publ., 2004. 172 p.
2. Kandyrin Yu. V. Shkurina G. L. Dva podkhoda k strukturirovaniyu alternativ [Two approaches to structuring alternatives]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2012, no. 4 (80), pp. 107–110.
3. Melnik V. Yu., Kamaev V. A. Kizim A. V. *Primenenie nemetriceskogo metoda Pareto dlya zadachi planirovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta* [Application of Pareto unmetric method for planning problem of maintenance and repair]. *Izvestiya VolGTU. Problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh* [News of Volgograd State Technical University. Problems of management, computer science and informatics in technical systems], 2011, vol. 11, no. 12, pp. 103–106.
4. Molodtsov O. A., Fedorov V. V. *Ustoychivost printsipov optimizatsii* [Stability of optimization principles]. *Sovremennoe sostoyanie teorii issledovaniya operatsiy* [Current state of the theory of operational research]. Moscow, Nauka, 1979, pp. 236–263.
5. Podinovskiy V. V. *Analiz ustoychivosti rezultatov vybora pri chastichnom otnoshenii predpochteniya* [Analysis of stability of choice results with relation partial of preference]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2009, no. 4, pp. 45–52. ISSN 2071-8594.
6. Tiori T., Fray Dzh. *Proektirovanie struktur baz dannykh* [Design of databases structures], in 2 books. Moscow, Mir, 1985. 320 p.

7. Shkurina G. L. Ispolzovanie protsedur vybora dlya postroeniya ocheredey remonta oborudovaniya [Use of choice procedure for creation turns of equipment repair]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2011, no. 3 (73), pp. 74–78.

8. Kandyrin Y. W., Rörs G. Interaktive und automatische Recherche von Invormationen für den Konstrukteur. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technische Universität Dresden, 1984, h. 2, no. 33, s. 147–151.

9. Levitin A., Anany V. Introduction to the Design & Analysis of Algorithms. M., Vilyams, 2006, p. 1296. ISBN 0-07-013151-1.

10. Tanino N., Sawaragi Y. Stability of nondominated solutions in multicriteria decision-making. *J. Opt. Theory and Appl.*, 1980, vol. 30, no. 2, pp. 229–253.

УДК 004.056

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВУЗА И ЕЕ АПРОБАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ АСТРАХАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Статья поступила в редакцию 27.12.2013, в окончательном варианте 14.01.2014.

Азмухамедов Искандар Маратович, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Учаев Дмитрий Юрьевич, ведущий программист, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: uchaevdyu@icloud.com

Азмухамедов Альберт Искандарович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: bert91@mail.ru

Авторами построена нечеткая когнитивная модель оценки уровня информационной безопасности (ИБ) вуза, которая позволяет связать данные по составу угроз, уязвимостей, средств защиты между собой и рассмотреть влияние потенциально возможных атак на основные сервисы безопасности информационных активов учебного заведения. Нечеткая когнитивная модель не только обеспечивает оценку уровня информационной безопасности, но и дает возможность выработать рекомендации по его повышению, более целенаправленно проводить поиск уязвимостей системы защиты информации, а также аккумулировать полученные при этом знания. Проверка адекватности разработанной модели была осуществлена на примере Астраханского государственного технического университета. Проверка показала достаточно хорошее соответствие между теоретическими результатами и данными реального тестирования системы обеспечения информационной безопасности, проведенного специально подобранной командой. Разработанная авторами методика может быть применена для оценки уровня ИБ высших учебных заведений.

Ключевые слова: информационная безопасность, нечеткая когнитивная модель, атака на информационные ресурсы, защита информации, информационный актив, безопасность вуза, свертка векторного критерия, нечеткий классификатор