

Многокритериальный выбор в пространстве признаков большой размерности: мультиметодная технология ПАКС-М

Аннотация. Рассматривается новая мультиметодная технология многокритериального выбора ПАКС-М (Последовательное Агрегирование Классифицируемых Ситуаций многими Методами). Технология обеспечивает снижение размерности признакового пространства, построение нескольких иерархических систем составных критериев и интегрального показателя качества, которые агрегируют исходные признаки, классификацию и/или упорядочение многопризнаковых объектов, используя разные комбинации нескольких методов принятия решений. Технология базируется на знаниях эксперта и/или предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), существенно сокращает время и трудоемкость решения задачи многокритериального выбора, позволяет ЛПР проводить содержательный анализ полученных результатов. Разработанная технология была применена на практике для многокритериального выбора перспективного вычислительного комплекса.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, снижение размерности признакового пространства, иерархическое агрегирование признаков, составной критерий, интегральный показатель, оценка перспективности, вычислительный комплекс.

Введение

Одним из достаточно распространенных классов задач принятия решений являются задачи многокритериального выбора, в которых рассматривается малое (обычно 3-5) число объектов (систем, вариантов, альтернатив), а число признаков, характеризующих свойства объектов, достаточно велико и может достигать десятков и сотен. Примерами таких задач служат задачи стратегического и уникального выбора: выбор места строительства аэропорта, электростанции, выбор трассы прокладки газо- или нефтепровода, выбор перспективной схемы развития метрополитена, выбор конфигурации сложной технической системы.

В таких ситуациях эксперту и/или лицу, принимающего решение (ЛПР), весьма непросто сделать выбор лучшего объекта, упорядочить или классифицировать объекты, поскольку

они, как правило, оказываются формально несравнимыми по значениям своих атрибутов. Известные методы решения задач многокритериального выбора [1-3, 5, 7, 12] не всегда оказываются пригодными в рассматриваемом случае, так как требуют значительных трудозатрат, связанных с получением, обработкой и представлением больших объемов информации о свойствах объектов, знаниях и/или предпочтениях ЛПР. Кроме того, при решении задач большой размерности нередко применяют различные упрощенные стратегии, учитывающие только часть имеющейся информации, что отрицательно сказывается на итогах – ранжировке объектов, выработке решающих правил, построении границ классов решений – и затрудняет анализ полученных результатов.

Эти обстоятельства диктуют необходимость создания способов обработки информации, позволяющих решать задачи многокритериаль-

¹ Работа поддержана программой фундаментальных исследований президиума РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» и ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация», Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 14-07-00916, 14-29-05025), Российским гуманитарным научным фондом (проекты 12-33-10608, 14-32-13004).

ного выбора в пространствах большой размерности. Один из подходов состоит в сокращении размерности признакового пространства [10] и использовании психологически корректных операций получения информации от ЛПР и экспертов [1]. Человеку, в силу особенностей его физической памяти, легче оперировать небольшой по объему информацией, сравнивать объекты по небольшому числу показателей, результаты таких сравнений более надежны, их проще анализировать. На практике для этого бывает достаточно использовать от трех до семи показателей, описывающих объекты. Специальные исследования показали также, что человек допускает меньше ошибок, если показатели имеют не числовые, а вербальные шкалы [3].

В работе представлена новая мультиметодная технология многокритериального выбора ПАКС-М (Последовательное Агрегирование Классифицируемых Ситуаций многими Методами), которая предназначена для сравнения, упорядочения и классификации многопризнаковых объектов по их свойствам и является модификацией многоэтапной технологии ПАКС (Последовательное Агрегирование Классифицируемых Ситуаций) [10]. Технология ПАКС-М обеспечивает снижение размерности признакового пространства путем последовательного агрегирования большого числа исходных характеристик объектов (числовых, символьных или вербальных) в небольшое число составных критериев или единственный интегральный показатель качества, которые имеют небольшие шкалы вербальных градаций оценок, отражающих знания эксперта и/или предпочтения ЛПР. Шкалы критериев конструируются с помощью разных комбинаций методов вербального анализа решений. Процедура агрегирования признаков имеет блочный характер, за счет чего значительно сокращаются трудоемкость и время получения итоговых результатов, появляется возможность их содержательного объяснения.

В технологии ПАКС-М в развитие технологии ПАКС строится нескольких иерархических систем с различными наборами итоговых критериев, которые в свою очередь используются при решении рассматриваемой задачи многокритериального выбора. Итоговые критерии в компактной форме передают содержательный смысл исходных характеристик и дают возможность обосновать выбор наиболее предпочтительного варианта. Сокращение числа кри-

териев оценки позволяет ЛПР не только решить задачу выбора, но и упрощает анализ полученных результатов. Вместе с тем при слишком малом числе итоговых критериев и недостаточно продуманном агрегировании исходных показателей на предыдущих уровнях иерархии могут возникать ситуации, когда все рассматриваемые варианты при их очевидном различии имеют одинаковые оценки. Осуществить выбор в таких случаях невозможно.

Многометодная технология ПАКС-М, ориентированная на решение задачи выбора несколькими методами, предоставляет эксперту или ЛПР возможность избежать возникновения противоречий на разных этапах процедуры агрегирования критериев. Такая возможность обеспечивается путём выявления агрегированного группового предпочтения, реализуемого с помощью нескольких методов группового многокритериального выбора и процедуры голосования. Сопоставление результатов решения рассматриваемой задачи, полученных несколькими методами для разных систем критериев, позволяет провести анализ итоговых результатов, сравнить системы критериев между собой, выбрать наиболее предпочтительную систему и оценить качество сделанного выбора.

Разработанная технология ПАКС-М была применена на практике для многокритериального выбора перспективного вычислительного комплекса [4, 9, 13].

1. Мультиметодная технология многокритериального выбора

Задача многокритериального выбора в самом общем виде формулируется следующим образом. Задана совокупность вариантов (альтернатив) $A_1, \dots, A_p$, оцененных одним или несколькими экспертами по многим критериям $K_1, \dots, K_m$. Каждый критерий K_i имеет шкалу $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}$, $i=1, \dots, m$, дискретные числовые или вербальные градации которой в ряде случаев упорядочены. Основываясь на знаниях экспертов и/или предпочтениях ЛПР, требуется: (1) выделить один или несколько лучших вариантов; (2) упорядочить все варианты; (3) распределить исходную совокупность вариантов по нескольким классам (категориям).

Для решения задач многокритериального выбора разработана мультиметодная технология многокритериального выбора ПАКС-М

(Последовательное Агрегирование Классифицируемых Ситуаций многими Методами). Технология ПАКС-М обеспечивает снижение размерности признакового пространства, построение нескольких иерархических систем составных критериев и интегрального показателя качества, которые агрегируют исходные признаки, классификацию и/или упорядочение многопризнаковых объектов, используя разные комбинации нескольких методов принятия решений. Рассмотрим основные этапы решения задачи многокритериального выбора с применением технологии ПАКС-М.

Первоначально при участии ЛПР и/или эксперта формируется набор исходных характеристик анализируемых объектов. При постановке задачи выбора желательно включить в число исходных признаков такие показатели, которые отражают основные свойства объектов. В зависимости от специфики задачи эти характеристики могут быть либо заданы заранее, либо сформированы в процессе анализа проблемы. Для каждого исходного показателя строится шкала, которая может иметь числовые (точечные, интервальные) или вербальные градации оценок. Шкалы исходных показателей могут совпадать с обычно используемыми на практике, либо конструироваться специально.

Далее, основываясь на знаниях эксперта и/или предпочтениях ЛПР, проводится снижение размерности признакового пространства путем построения иерархической системы критериев. Различные комбинации исходных признаков (кортежи оценок) агрегируются в меньшие наборы новых признаков (составных критериев), имеющих для ЛПР или эксперта вполне определенный смысл. Процедура агрегирования носит последовательный характер, т.е. полученные группы критериев объединяются поочередно в новые группы следующего уровня иерархии. Агрегирование критериев является, как правило, многоэтапной процедурой. Поэтому рекомендуется на каждом этапе агрегирования объединять в составной критерий небольшое число показателей (обычно 2-3, реже 4, 5 и более), одновременно увеличивая число стадий агрегирования. Итогом является иерархическая система критериев, верхний уровень которой определяется содержанием рассматриваемой практической проблемы. Это может быть несколько итоговых критериев или, если это необходимо, единственный интеграль-

ный показатель. Более детально процедура агрегирования качественных показателей при снижении размерности пространства признаков описана в работе [10].

Затем формируются шкалы всех составных критериев. Построение шкалы составного критерия рассматривается как задача порядковой классификации, где в качестве классифицируемых объектов выступают комбинации градаций оценок исходных показателей, а классами решений являются градации оценок составного критерия. Тем самым каждая градация оценок на шкале составного критерия будет соответствовать некоторой комбинации градаций оценок исходных показателей. ЛПР определяет также смысловое содержание градаций шкал оценок. Критерии должны иметь такие шкалы оценок, которые, с одной стороны, отражают агрегированные свойства объектов, а с другой стороны, понятны ЛПР/эксперту при окончательном упорядочении или классификации объектов. Рекомендуется строить шкалы критериев с небольшим (2-3, в редких случаях 4 и более) числом вербальных градаций. Это позволит сократить общее время на решение задачи выбора и облегчит объяснение и понимание полученных результатов за счет унификации и упрощения процедуры формирования шкал составных критериев.

Конструировать градации шкал составных критериев можно различными способами, используя разные методы для построения самой шкалы составного критерия, выбирая разные числа градаций и диапазоны изменения переменных на градациях шкал критериев предыдущего или данного уровня иерархии исходя из предпочтений ЛПР или знаний эксперта. Для формирования шкалы оценок составного критерия в технологии ПАКС применяют различные методы вербального анализа решений [3, 7]. Наиболее простым и легко воспринимаемым ЛПР способом конструирования порядковой шкалы составного критерия является метод стратификации кортежей, в котором используются однотипные (например, с одинаковым числом градаций) наборы порядковых вербальных шкал исходных показателей. Сложнее методы вербального анализа решений ЗАПРОС, ОРКЛАСС или ЦИКЛ, которые оперируют на множестве всех возможных кортежей оценок в признаковом пространстве, образованном декартовым произведением градаций оценок на

шкалах критериев. Чтобы уменьшить влияние особенностей различных способов формирования шкал составных критериев, предлагается на разных стадиях агрегирования применять разные способы и/или их сочетания.

Построение дерева агрегирования показателей и конструирование шкал оценок для составных критериев представляет собой постоянный баланс между снижением временных затрат и упрощением выбора для ЛПР, с одной стороны, и более четким различием между собой объектов выбора, с другой. ЛПР/эксперт может отдавать предпочтение тем или иным факторам в зависимости от требований решаемой задачи выбора, своих знаний и опыта.

Поскольку результат решения задачи многокритериального выбора зависит от итоговых критериев, описывающих анализируемые объекты, в технологии ПАКС-М строится несколько иерархических систем составных критериев, различным образом агрегирующих исходные характеристики. Число, состав и содержание критериев каждого уровня иерархии в системе критериев, в том числе самого верхнего уровня, определяет ЛПР, основываясь на своем опыте и интуиции. В качестве критерия можно выбрать один из исходных показателей или несколько исходных характеристик, объединенных в составной критерий. ЛПР устанавливает, какие исходные показатели будут считаться самостоятельными критериями, а какие будут отнесены к тому или иному составному критерию. Каждую такую систему критериев удобно рассматривать как выражение точки зрения (предпочтений, знаний) некоторого ЛПР/эксперта. Иными словами, можно считать, что при использовании любой из иерархических систем критериев каждый объект оценивается несколькими независимыми экспертами.

На заключительном этапе проводится решение задачи многокритериального выбора в полученном пространстве итоговых критериев меньшей размерности. Использование нескольких иерархических систем составных критериев, разных способов построения шкал составных критериев и интегрального показателя превращает исходную задачу выбора в задачу коллективного выбора, в которой варианты представляются объектами, заданными многими нечисловыми признаками. Для повышения обоснованности результата решения в технологии ПАКС-М предусмотрена возможность

применения нескольких методов группового многокритериального выбора [7, 8]. Выполняется анализ результатов, полученных разными методами, и, если требуется, эти результаты агрегируются, воспользовавшись еще каким-либо методом группового принятия решения. После чего ЛПР/эксперт делает окончательный выбор.

Блок-схема решения задачи многокритериального выбора с помощью технологии ПАКС-М состоит из следующих шагов (Рис. 1).

Шаг 1. Выбрать тип задачи T . Возможны следующие задачи: T_1 – выделить лучший вариант; T_2 – упорядочить варианты; T_3 – разделить варианты на упорядоченные группы.

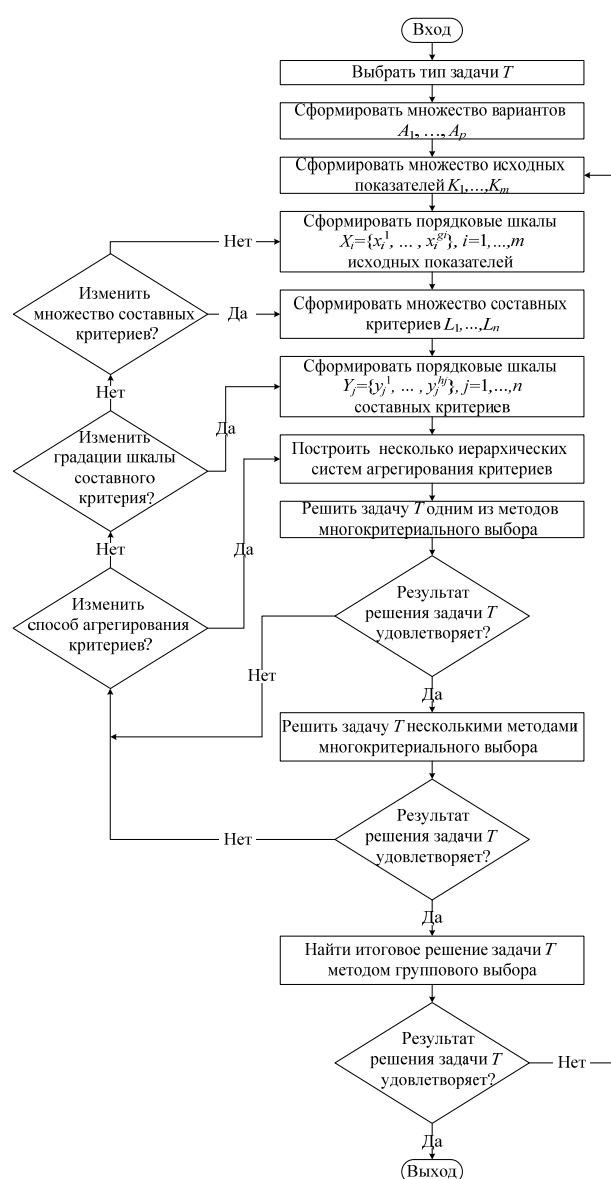


Рис. 1. Блок-схема мультиметодной технологии ПАКС-М

Шаг 2. Сформировать множество вариантов $A_1, \dots, A_p, p \geq 2$ решения задачи T .

Шаг 3. Сформировать множество исходных показателей (признаков) $K_1, \dots, K_m, m \geq 2$.

Шаг 4. Сформировать порядковые шкалы $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}, i=1, \dots, m$ исходных показателей в зависимости от типа задачи T .

Шаг 5. Сформировать множество составных критериев $L_1, \dots, L_n, n < m$, т.е. обобщенных показателей, определяющих выбранное ЛПР свойство вариантов, которые агрегируют исходные характеристики $K_1, \dots, K_m$.

Шаг 6. Сформировать порядковые шкалы $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^{h_j}\}, j=1, \dots, n$ составных критериев. Каждая градация шкалы составного критерия является комбинацией градаций оценок исходных показателей. Возможны следующие способы агрегирования показателей: W_1 – стратификация кортежей; W_2 – многокритериальная порядковая классификация кортежей; W_3 – ранжирование кортежей.

Шаг 7. Построить несколько иерархических систем агрегирования критериев, используя для формирования шкал составных критериев на разных уровнях разные способы агрегирования показателей и/или комбинаций способов.

Шаг 8. Решить задачу T одним из методов многокритериального выбора. Если полученный результат удовлетворяет ЛПР, то сохранить результат и перейти к шагу 9. Иначе предлагается: либо изменить метод решения задачи T (переход к шагу 8), изменить способ агрегирования показателей и построить новую иерархическую систему составных критериев (переход к шагу 7), либо изменить шкалу $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^{h_j}\}, j=1, \dots, n$ одного или нескольких составных критериев (переход к шагу 6), либо сформировать новое множество составных критериев $L_1, \dots, L_n$ (переход к шагу 5), либо изменить шкалу $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}, i=1, \dots, m$ одного или нескольких исходных показателей $K_1, \dots, K_m$ (переход к шагу 4).

Шаг 9. Решить задачу T несколькими методами многокритериального выбора. Если полученные результаты удовлетворяют ЛПР, то сохранить результаты и перейти к шагу 10. Иначе переход к шагу 8.

Шаг 10. Найти итоговое решение задачи T методом группового выбора, провести анализ и обосновать решение. Если итоговое решение задачи T удовлетворяет ЛПР, то алгоритм за-

вершает работу. Иначе переход к шагу 3, и задача T решается заново.

Эффективность технологии ПАКС-М при решении задач многокритериального выбора может оцениваться по-разному в зависимости от типа задачи T . Например, применительно к задачам ранжирования под оценкой эффективности понимается соотношение числа несравнимых альтернатив до и после снижения размерности. В задачах классификации эффективность оценивается числом обращений к ЛПР/эксперту, необходимых для построения полной непротиворечивой классификации. Соответственно можно сравнивать число обращений к ЛПР при решении задачи классификации на исходном и новом пространстве признаков. Однако для задач классификации большой размерности такой подход не всегда приемлем, т.к. построить полную непротиворечивую классификацию на исходном признаковом пространстве в ряде случаев просто не представляется возможным. Это связано с тем, что с ростом размерности признакового пространства растет как число объектов, предъявляемых ЛПР для классификации, так и их сложность.

2. Показатели и критерии оценки вычислительных комплексов

В качестве примера использования технологии ПАКС-М рассмотрим задачу многокритериальной оценки и выбора перспективного малогабаритного вычислительного комплекса персонального уровня (ВКПУ) [4, 9, 13]. В настоящее время такие комплексы находят всё большее применение при решении различных научных и прикладных задач и выступают альтернативой дорогостоящим суперкомпьютерам и высокопроизводительным кластерам.

Стоимость создания вычислительных комплексов постоянно снижается, благодаря массовому выпуску стандартных комплектующих изделий и растущей конкуренции среди производителей. Построение вычислительных систем из стандартных компонентов привело к тому, что на рынке представлено много комплексов различных конфигураций и перед пользователем, которому нужно решить собственную прикладную задачу, встает проблема выбора наиболее предпочтительной конфигурации вычислительного комплекса.

Сравнение и выбор сложных комплексов и систем, в частности, технических, представляет собой слабо структурируемую и плохо формализованную задачу. Это обусловлено тем, что такие комплексы характеризуются большим числом исходных показателей, а выбор осуществляется по многим количественным и качественным критериям. Вместе с тем, как правило, вариантов конфигураций бывает немного, и такие комплексы оказываются несравнимыми друг с другом по своим параметрам, что не позволяет применять для выбора лучшего варианта многие известные методы принятия решений.

Исходный перечень альтернатив в задаче выбора наиболее перспективного вычислительного комплекса состоял из трёх вариантов: ВК1, ВК2 и ВК3. Первоначально, по результатам специально проведенного анализа, в качестве исходных характеристик вычислительных комплексов были выбраны 30 показателей, образовавших следующие группы.

ХМ. Технические характеристики модуля (частота ядра процессора; разрядность ядра процессора; количество потоков; количество ядер процессора; объем поддерживаемой процессором оперативной памяти; количество процессоров в модуле; объем оперативной памяти модуля; наличие ускорителя универсальных вычислений; дисковая память модуля; наличие в модуле оптического накопителя данных).

ВХ. Вычислительные характеристики комплекса (число модулей в комплексе; скорость обмена между модулями; наличие встроенных средств ввода-вывода; наличие бесперебойного питания; программные характеристики комплекса; возможность модернизации технических и программных средств комплекса).

КХ. Конструкционные характеристики комплекса (размеры комплекса (высота, глубина, ширина); масса комплекса; защищенность от помех).

ЭХ. Эксплуатационные характеристики комплекса (энергопотребление; уровень шума; тепловыделение; условия эксплуатации (температура, влажность); наработка на отказ).

ПК. Производительность комплекса.

СИ. Стоимость изготовления комплекса.

Для каждого исходного показателя была сформирована вербальная шкала оценок с 3 градациями. Например, производительность комплекса оценивалась как ПК⁰ – высокая (>2000 Гфлопс); ПК¹ – средняя (2000-500 Гфлопс); ПК²

– низкая (<500 Гфлопс), а стоимость изготовления комплекса СИ⁰ – высокая; СИ¹ – средняя; СИ² – низкая (значения опущены).

Построение иерархической системы критериев является неформализованной процедурой, основанной на предпочтениях и знаниях ЛПР/эксперта. Процедура агрегирования характеристик включает в себя: разбиение исходных показателей на группы, в которых критерии близки друг другу по смыслу или являются неотъемлемыми характеристиками какого-либо составного критерия; построение иерархического дерева агрегирования показателей на основе сформированных групп критериев; формирование порядковых шкал оценок для составных критериев с указанием диапазона оценок исходных показателей для каждой градации на шкале.

Построение дерева агрегирования исходных характеристик и формирование шкал оценок составных критериев являются наиболее сложными и ответственными этапами в технологии ПАКС-М. Обратим внимание на следующие особенности:

- объединение большого числа исходных показателей в составной критерий может создать затруднения для ЛПР при объяснении полученных результатов выбора;

- увеличение числа градаций на шкалах оценок показателей любого уровня иерархии увеличивает число комбинаций оценок при их агрегировании в составной критерий, что в свою очередь усложняет всю процедуру агрегирования критериев и увеличивает временные затраты ЛПР на решение задачи выбора.

Когда объект имеет достаточно много характеристик (десятки, как в данном случае), достаточно трудно заранее сказать, какие из характеристик окажутся существенными для выбора объекта. Это становится ясным только после решения задачи. Тогда ряд исходных признаков можно исключить из рассмотрения, что даст упрощение задачи выбора. Кроме того, сразу объединять все исходные показатели в несколько итоговых критериев или в один единственный интегральный критерий достаточно сложно, а порой и просто невозможно. Заранее трудно себе представить, как будет определяться ценность того или иного варианта выбора, который одновременно характеризуется показателями, отражающими технические, конструкционные, эксплуатационные, экономические и другие свойства объекта. Во-

первых, это очень трудоемко, а во-вторых, результаты выбора (если они вообще будут получены) будет сложно объяснить.

В зависимости от специфики объектов при построении дерева агрегирования показателей рекомендуется предварительно определить, какие из показателей могут рассматриваться в качестве итоговых критериев. В нашем случае такими критериями стали ПК. Производительность комплекса и СИ. Стоимость изготовления комплекса. Использование СИ и ПК как итоговых критериев связано с их особой ролью. СИ является единственным показателем, характеризующим материальные затраты на приобретение вычислительного комплекса, а ПК обеспечивает сравнение скорости вычислений, выполняемых комплексом. Остальные исходные показатели комплекса были объединены в три составных критерия: ВХ. Вычислительные характеристики комплекса, КХ. Конструкцион-

ные характеристики комплекса, ЭХ. Эксплуатационные характеристики комплекса.

При построении иерархической системы критериев группа показателей «Технические характеристики модуля» вошла в качестве составной части в вычислительные характеристики комплекса. Поэтому, как в итоге оказалось, можно было бы в исходных показателях вместо всей группы признаков, характеризующих свойства модуля, задать один единственный показатель или вообще исключить свойства модуля из перечня исходных показателей. Деревья, агрегирующие исходные показатели в технические характеристики модуля и вычислительные характеристики комплекса, куда включены и технические характеристики модуля, приведено в работе [9]. На Рис.2 и Рис.3 изображены деревья, агрегирующие исходные показатели в конструкционные и эксплуатационные характеристики комплекса.

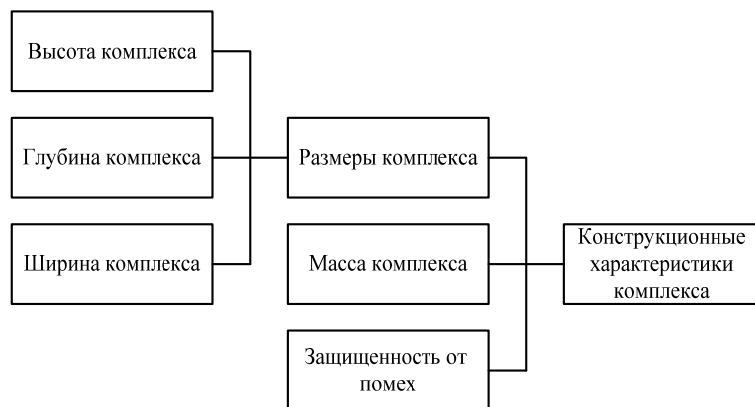


Рис. 2. Дерево «Конструкционные характеристики комплекса»

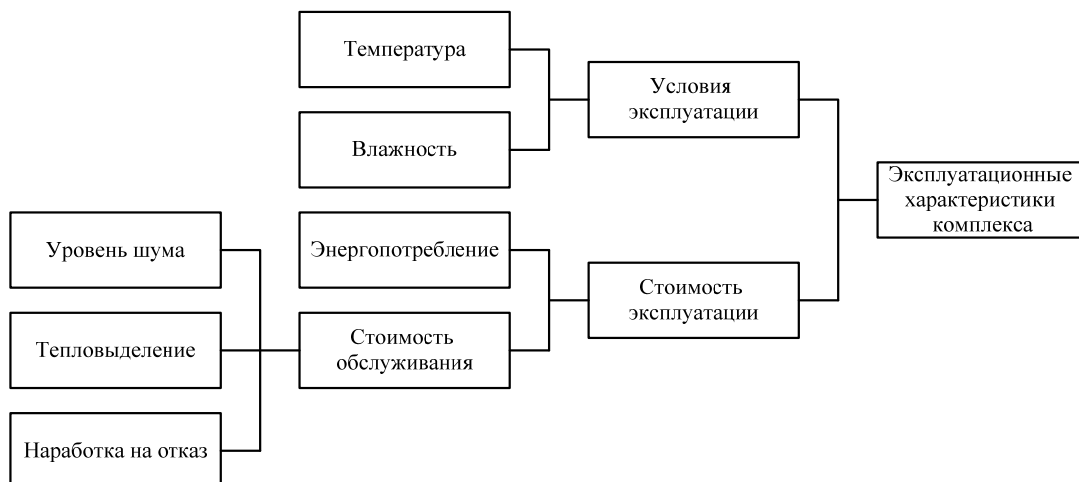


Рис. 3. Дерево «Эксплуатационные характеристики комплекса»

При агрегировании показателей в составные критерии формирование вербальных градаций шкал составных критериев выполняется на основе комбинаций градаций оценок исходных показателей. Поэтому очень важно правильно именовать составной критерий, чтобы его название сочетало в себе свойства объединяемых характеристик и было понятным для ЛПР. Конструировать каждую градацию шкалы составного критерия можно различными способами, используя разные методы для формирования самой шкалы составного критерия, выбирая разные числа градаций и диапазоны изменения переменных на градациях шкал критериев предыдущего или данного уровня иерархии исходя из предпочтений ЛПР или знаний эксперта.

В рассматриваемом примере градации шкалы каждого составного критерия строились методом стратификации кортежей тремя способами с назначением разных диапазонов изменения градаций на шкале. Поэтому, считая каждую построенную систему критериев как выражение точки зрения некоторого ЛПР/эксперта, получаем, что каждый вариант комплекса оценивался тремя независимыми экспертами.

Отметим, что определение комбинаций градаций оценок (кортежей оценок) по критериям предыдущего уровня иерархии, которые образуют соответствующую градацию оценок на шкале критерия следующего уровня иерархии, также является субъективной неформализованной процедурой, которая выполняется ЛПР/экспертом. При этом даже незначительное изменение диапазона переменных в какой-нибудь градации одного из критериев может оказать заметное влияние на совокупности кортежей оценок, входящих в те или иные градации оценок на шкалах составных критериев следующих уровней и итогового критерия. Именно эти обстоятельства и диктуют необходимость построения нескольких иерархических систем критериев, различающихся между собой.

Для сравнения и выбора вычислительного комплекса было построено несколько иерархических систем с разной степенью агрегирования исходных характеристик в составные критерии, которые формировались разными способами. Критерии ПК, СИ, ВХ, КХ, ЭХ выступали и как итоговые критерии, и как промежуточные критерии при построении систем с тремя итоговыми критериями и с единственным интегральным показателем категории перспективности комплекса. Рассмотрим различные системы агрегирования критериев более детально.

По первой схеме агрегирования было выбрано 5 итоговых критериев: ПК, СИ, ВХ, КХ, ЭХ. Результаты многокритериальной оценки комплексов по пяти критериям, представленные в виде кортежей вербальных оценок, приведены в Табл. 1. Как следует из таблицы, комплексы несравнимы между собой.

По второй схеме агрегирования было выбрано 3 итоговых критерия: ПК, СИ, ОХ. Последний критерий «Обобщенные характеристики комплекса» объединяет вычислительные, конструкционные и эксплуатационные характеристики комплекса $ОХ=(ВХ, КХ, ЭХ)$ и имеет следующую вербальную шкалу оценок:
 $ОХ^0$ – *высокие* $(ВХ^0, КХ^0, ЭХ^0), (ВХ^0, КХ^0, ЭХ^1), (ВХ^0, КХ^1, ЭХ^0), (ВХ^1, КХ^0, ЭХ^0), (ВХ^0, КХ^1, ЭХ^1), (ВХ^1, КХ^0, ЭХ^1), (ВХ^1, КХ^1, ЭХ^0), (ВХ^0, КХ^0, ЭХ^2), (ВХ^0, КХ^2, ЭХ^0), (ВХ^2, КХ^0, ЭХ^0);$
 $ОХ^1$ – *средние* $(ВХ^1, КХ^1, ЭХ^1), (ВХ^2, КХ^0, ЭХ^1), (ВХ^2, КХ^1, ЭХ^0), (ВХ^0, КХ^2, ЭХ^1), (ВХ^1, КХ^2, ЭХ^0), (ВХ^0, КХ^1, ЭХ^2), (ВХ^1, КХ^0, ЭХ^2), (ВХ^2, КХ^1, ЭХ^1), (ВХ^1, КХ^2, ЭХ^1), (ВХ^1, КХ^1, ЭХ^2), (ВХ^0, КХ^2, ЭХ^2), (ВХ^2, КХ^2, ЭХ^0), (ВХ^2, КХ^0, ЭХ^2);$
 $ОХ^2$ – *низкие* $(ВХ^2, КХ^2, ЭХ^1), (ВХ^2, КХ^1, ЭХ^2), (ВХ^1, КХ^2, ЭХ^2), (ВХ^2, КХ^2, ЭХ^2).$

Результаты многокритериальной оценки комплексов по трем критериям, представленные в виде кортежей вербальных оценок, приведены в Табл. 2. Как следует из Табл. 2, комплексы по-прежнему остаются несравнимыми между собой.

Табл. 1. Оценки комплексов, представленные в виде кортежей (1 схема агрегирования)

	ВК1	ВК2	ВК3
Эксперт 1	$(ПК^1, СИ^1, ВХ^2, КХ^0, ЭХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ВХ^1, КХ^2, ЭХ^1)$	$(ПК^0, СИ^2, ВХ^0, КХ^2, ЭХ^2)$
Эксперт 2	$(ПК^1, СИ^1, ВХ^2, КХ^0, ЭХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ВХ^0, КХ^2, ЭХ^1)$	$(ПК^0, СИ^2, ВХ^0, КХ^2, ЭХ^2)$
Эксперт 3	$(ПК^1, СИ^1, ВХ^2, КХ^0, ЭХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ВХ^1, КХ^2, ЭХ^1)$	$(ПК^0, СИ^2, ВХ^0, КХ^2, ЭХ^2)$

Табл. 2. Оценки комплексов, представленные в виде кортежей (2 схема агрегирования)

	ВК1	ВК2	ВК3
Эксперт 1	$(ПК^1, СИ^1, ОХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ОХ^2)$	$(ПК^0, СИ^2, ОХ^2)$
Эксперт 2	$(ПК^1, СИ^1, ОХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ОХ^1)$	$(ПК^0, СИ^2, ОХ^2)$
Эксперт 3	$(ПК^1, СИ^1, ОХ^0)$	$(ПК^2, СИ^0, ОХ^2)$	$(ПК^0, СИ^2, ОХ^2)$

В остальных схемах все исходные характеристики комплекса были агрегированы в единственный интегральный показатель КК. Категория комплекса, который был сформирован путем различного объединения критериев ПК, СИ, ВХ, КХ, ЭХ. Показатель КК характеризует предпочтительность комплекса для пользователя и имеет три вербальные градации оценок: $КК^0$ – перспективный комплекс, $КК^1$ – современный комплекс, $КК^2$ – устаревающий комплекс.

По третьей схеме агрегирования критерии ПК и ВХ объединяются в составной критерий «Вычислительный потенциал комплекса» $ВП=(ПК, ВХ)$. Критерии КХ и ЭХ объединяются в составной критерий «Затраты на обслуживание комплекса» $ЗО=(КХ, ЭХ)$. Далее критерии ВП, ЗО и СИ объединяются в интегральный показатель «Категория комплекса» $КК=(ВП, ЗО, СИ)$. Система составных критериев приведена на Рис. 4а.

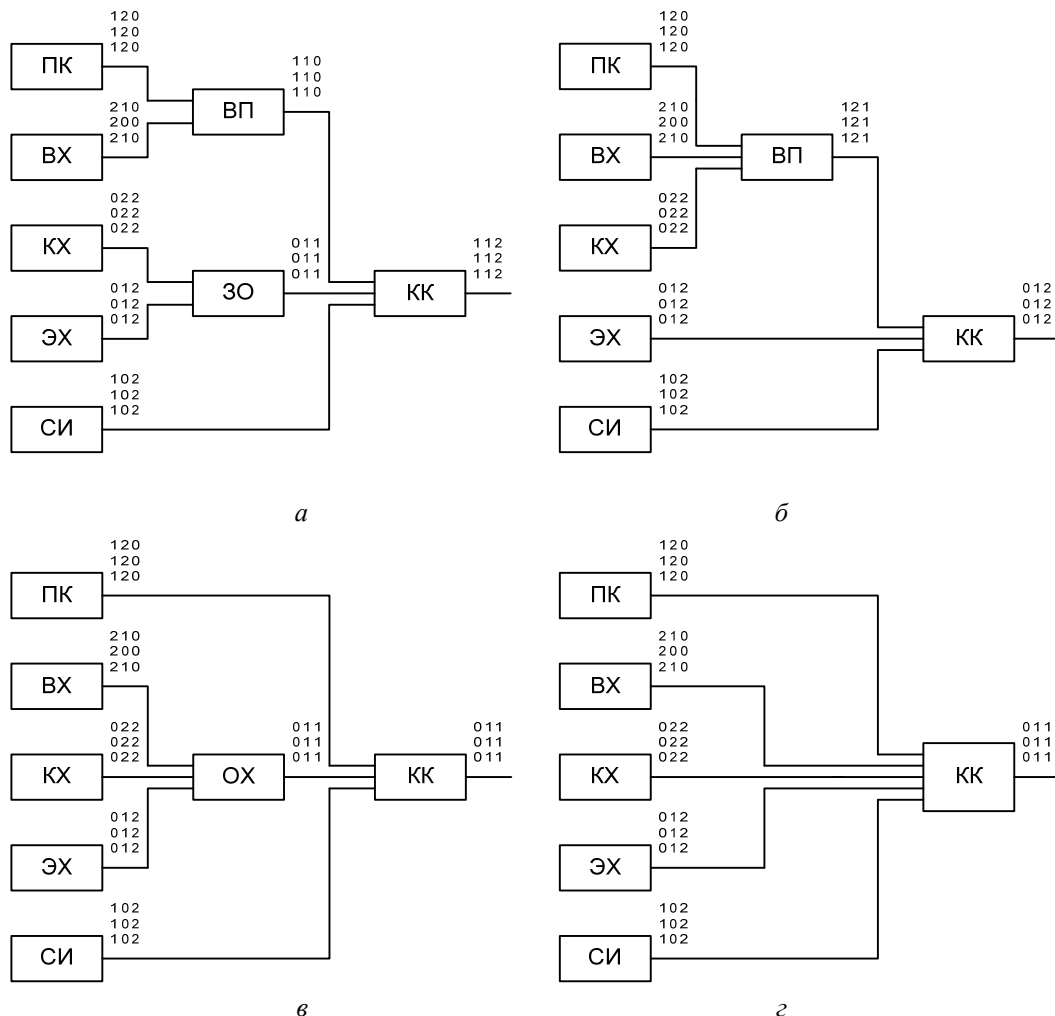


Рис. 4. Агрегирование критериев в интегральный показатель качества комплекса:
(а) третья схема, (б) четвертая схема, (в) пятая схема, (г) шестая схема.

По четвертой схеме агрегирования критерии ПК, ВХ и КХ объединяются в составной критерий «Вычислительный потенциал комплекса» ВП=(ПК, ВХ, КХ). Далее критерии ВП, ЭХ и СИ объединяются в интегральный показатель «Категория комплекса» КК=(ВП, ЭХ, СИ). Система составных критериев приведена на Рис. 4б.

По пятой схеме агрегирования критерии ВХ, КХ и ЭХ объединяются в составной критерий «Обобщенные характеристики комплекса» ОХ=(ВХ, КХ, ЭХ). Затем критерии ПК, СИ и ОХ объединяются в интегральный показатель «Категория комплекса» КК=(ПК, СИ, ОХ), который имеет следующую вербальную шкалу оценок:

КК. Категория комплекса
 $КК^0$ – *перспективный* $(ПК^0, СИ^0, ОХ^0), (ПК^0, СИ^0, ОХ^1), (ПК^0, СИ^1, ОХ^0), (ПК^1, СИ^0, ОХ^0), (ПК^0, СИ^1, ОХ^1), (ПК^1, СИ^0, ОХ^1), (ПК^1, СИ^1, ОХ^0), (ПК^0, СИ^0, ОХ^2), (ПК^0, СИ^2, ОХ^0), (ПК^2, СИ^0, ОХ^0);$
 $КК^1$ – *современный* $(ПК^1, СИ^1, ОХ^1), (ПК^0, СИ^1, ОХ^2), (ПК^1, СИ^0, ОХ^2), (ПК^0, СИ^2, ОХ^1), (ПК^1, СИ^2, ОХ^0), (ПК^2, СИ^0, ОХ^1), (ПК^2, СИ^1, ОХ^0);$
 $КК^2$ – *устаревающий* $(ПК^1, СИ^1, ОХ^2), (ПК^1, СИ^2, ОХ^1), (ПК^2, СИ^1, ОХ^1), (ПК^0, СИ^2, ОХ^2), (ПК^2, СИ^0, ОХ^2), (ПК^2, СИ^2, ОХ^0), (ПК^1, СИ^2, ОХ^2), (ПК^2, СИ^1, ОХ^2), (ПК^2, СИ^2, ОХ^1), (ПК^2, СИ^2, ОХ^2).$

Система составных критериев приведена на Рис. 4в.

По шестой схеме агрегирования все пять критериев сразу объединяются в интегральный показатель «Категория комплекса» КК=(ПК, ВХ, КХ, ЭХ, СИ). Градации порядковой шкалы показателя КК здесь не приведены из-за громоздкости. Они формировались следующим образом. Комплекс считался перспективным ($КК^0$), если сумма градаций оценок критериев, входящих в показатель КК, не превышала значение 4. Комплекс считался современным ($КК^1$), если сумма градаций оценок критериев, входящих в показатель КК, равнялась 5 или 6. Комплекс считался устаревающим ($КК^2$), если сумма градаций оценок критериев, входящих в показатель КК, превышала значение 6. Система составных критериев приведена на Рис. 4г.

Справа на рисунках указан формат представления оценок по каждому критерию: столбец – оценки соответствующего комплекса, данные тремя экспертами, строка – оценки трех комплексов, данные соответствующим экспертом.

3. Многокритериальный выбор вычислительного комплекса

Выбор наиболее предпочтительного варианта вычислительного комплекса проводился с помощью трех методов группового многокритериального выбора: метода АРАМИС (Агрегирование и Ранжирование Альтернатив около Многопризнаковых Идеальных Ситуаций), метода лексикографического упорядочивания по градациям критериальных оценок и метода взвешенных сумм рангов. Итоговое обобщенное упорядочение вариантов комплексов строилось при помощи процедуры Борда [7].

Метод АРАМИС (Агрегирование и Ранжирование Альтернатив около Многопризнаковых Идеальных Ситуаций) позволяет ранжировать объекты, оцененные несколькими экспертами по многим количественным и/или качественным критериям $K_1, \dots, K_m$, без построения индивидуальных ранжировок объектов. Многопризнаковые объекты $A_1, \dots, A_p$ рассматриваются как точки метрического пространства мультимножеств с некоторой метрикой [6]. Наилучший и наихудший объекты (которые могут быть и гипотетическими) имеют соответственно самые высокие и самые низкие оценки по всем критериям по суждениям всех экспертов. Все объекты можно по-разному упорядочить в метрическом пространстве, например, по значению показателя относительной близости к наилучшему объекту $L_+(A_q) = d_+ / (d_+ + d_-)$, где $d_+ = d(A_+, A_q)$ – расстояние от объекта A_q до наилучшего объекта A_+ и $d_- = d(A_-, A_q)$ – расстояние до наихудшего объекта A_- .

Метод лексикографического упорядочивания вариантов основан на последовательном сравнении объектов по общему числу соответствующих градаций оценок. Сначала объекты упорядочивают по числу высоких оценок или числу первых мест, затем по числу средних оценок или вторых мест, далее по числу низких оценок или третьих мест. Наиболее предпочтительным объектом становится тот, у которого наибольшее число высоких оценок. Если объектов с одинаковым числом высоких оценок несколько, то сравнение этих объектов происходит по числу оценок, соответствующих второму месту, третьему месту и т.д.

Метод взвешенных сумм рангов основан на том, что разным градациям экспертных оценок ставится в соответствие определенный ранг и

вес, соответствующий рангу градации. Объекты упорядочиваются по сумме произведений числа градаций оценок на вес ранга, которая тем самым выступает как функция ценности объекта. Наиболее предпочтительный объект определяется по максимальной сумме произведений числа градаций оценок на вес ранга. В данной работе высокой градации оценки был присвоен вес 3, средней градации – вес 2, низкой градации – вес 1.

Для дальнейшего сравнения комплексов и выбора наилучшего варианта экспертные оценки комплекса BK_i , $i=1, 2, 3$ были представлены как мультимножество или множество с повторяющимися элементами:

$$A_i = \{k_{Ai}(x_1^1) \circ x_1^1, \dots, k_{Ai}(x_1^{h1}) \circ x_1^{h1}, \dots, k_{Ai}(x_s^1) \circ x_s^1, \dots, k_{Ai}(x_s^{hs}) \circ x_s^{hs}\}.$$

Порождающим для мультимножества A_i множеством служит по первой схеме агрегирования критериев множество $X=X_1 \cup \dots \cup X_5$ всех градаций оценок на шкалах X_s критериев ПК, СИ, ВХ, КХ, ЭХ; по второй схеме – множество $X=X_1 \cup \dots \cup X_3$ всех градаций оценок на шкалах X_s критериев ПК, СИ, ОХ. Число $k_{Ai}(x_s^{es})$ указывает, сколько раз градация оценки $x_s^{es} \in X_s$, $s=1, \dots, 5$ или $s=1, 2, 3$, $e_s=0, 1, 2$ встречается в описании соответствующего комплекса BK_i , знак $\circ$ обозначает кратность градации оценки x_s^{es} [6].

Результаты сравнения комплексов разными методами по первой схеме агрегирования критериев, даны в Табл. 3.

Как следует из Табл. 3, по методу АРАМИС комплекс $BK1$ предпочтительнее комплекса

$BK2$, а комплекс $BK2$ предпочтительнее комплекса $BK3$: $BK1 > BK2 > BK3$; по методу лексикографического упорядочивания комплекс $BK1$ предпочтительнее комплекса $BK3$, а комплекс $BK3$ предпочтительнее комплекса $BK2$: $BK1 > BK3 > BK2$; по методу взвешенных сумм рангов комплексы $BK2$ и $BK3$ отличаются по сумме рангов незначительно и примерно равноценны, а комплекс $BK1$ предпочтительнее их обоих: $BK1 > BK2 \approx BK3$. Обобщенное упорядочение вариантов комплексов, построенное при помощи процедуры Борда, имеет вид: $BK1 > BK2 \approx BK3$. Таким образом, по первой схеме агрегирования критериев получаем, что комплекс $BK1$ предпочтительнее комплексов $BK2$ и $BK3$, которые можно считать примерно равноценными.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Сопоставляя оценки комплексов по пяти критериям, можно отметить, что комплекс $BK1$, по мнению экспертов, имеет две высокие (0 градация на шкале) оценки по критериям КХ и ЭХ, две средние (1 градация на шкале) оценки по критериям ПК и СИ, а также одну низкую (2 градация на шкале) оценку по критерию ВХ. Преобладание высоких и средних оценок по большинству критериев выводит комплекс $BK1$ на первое место по предпочтительности в сравнении с комплексами $BK2$ и $BK3$. Комплексы $BK2$ и $BK3$ по совокупности оценок уступают комплексу $BK1$ и примерно равноценны.

Результаты сравнения комплексов разными методами по второй схеме агрегирования критериев, даны в Табл. 4.

Табл. 3. Оценки комплексов, представленные в виде мультимножеств, и результаты сравнения комплексов (1 схема агрегирования)

	ПК ⁰	ПК ¹	ПК ²	СИ ⁰	СИ ¹	СИ ²	ВХ ⁰	ВХ ¹	ВХ ²	КХ ⁰	КХ ¹	КХ ²	ЭХ ⁰	ЭХ ¹	ЭХ ²	$I_+(BK_i)$	1м	2м	3м	Σ
BK1	0	3	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0,43	6	6	3	33
BK2	0	0	3	3	0	0	1	2	0	0	0	3	0	3	0	0,55	4	5	6	28
BK3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0,60	6	0	9	27

Табл. 4. Оценки комплексов, представленные в виде мультимножеств, и результаты сравнения комплексов (2 схема агрегирования)

	ПК ⁰	ПК ¹	ПК ²	СИ ⁰	СИ ¹	СИ ²	ОХ ⁰	ОХ ¹	ОХ ²	$I_+(BK_i)$	1м	2м	3м	Σ
BK1	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0,40	3	6	0	21
BK2	0	0	3	3	0	0	0	1	2	0,60	3	1	5	16
BK3	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0,67	3	0	6	15

Как следует из Табл. 4, по методу АРАМИС комплекс ВК1 предпочтительнее комплекса ВК2, а комплекс ВК2 предпочтительнее комплекса ВК3: $BK1 > BK2 > BK3$; по методу лексикографического упорядочивания комплекс ВК1 предпочтительнее комплекса ВК2, а комплекс ВК2 можно считать примерно равноценным комплексу ВК3: $BK1 > BK2 \approx BK3$; по методу взвешенных сумм рангов комплексы ВК2 и ВК3 отличаются по сумме рангов незначительно и примерно равноценны, а комплекс ВК1 предпочтительнее их обоих: $BK1 > BK2 \approx BK3$. Обобщенное упорядочение вариантов комплексов по второй схеме агрегирования критериев также строилось при помощи процедуры Борда. Оно имеет вид: $BK1 > BK2 > BK3$ и несколько отличается от упорядочения, полученного по первой схеме агрегирования критериев.

Сравнение комплексов по интегральному показателю КК. Категория комплекса, полученному по третьей схеме агрегирования критериев, показало, что $BK1 \approx BK2 > BK3$. Это не вполне согласуется с результатами сравнения комплексов по пяти критериям и связано с тем, что введенный промежуточный критерий ВП уравнивал между собой комплексы ВК1 и ВК2, что привело к иному результату. Кроме того, критерии ВП и ЗО усложняют объяснение полученного результата.

При сравнении комплексов по показателю КК, полученному по четвертой схеме агрегирования критериев, оказалось, что $BK1 > BK2 > BK3$. Полученные результаты в общем согласуются с результатами сравнения комплексов по пяти критериям. Однако, система агрегирования критериев, построенная по такой схеме, не позволяет внятно объяснить результаты.

При сравнении комплексов по показателю КК, полученному по пятой схеме агрегирования критериев, оказалось, что $BK1 > BK2 \approx BK3$. Сравнение по критерию ОХ показало, что комплекс ВК1 ненамного опережает комплексы ВК2 и ВК3, а те, в свою очередь, считаются равноценными. Сравнение комплексов по показателю «Категория комплекса» дало результаты, согласующиеся с результатами сравнения комплексов по пяти критериям. Полученные результаты можно объяснить следующим образом. По составному критерию ОХ комплекс ВК1 получает высокую оценку, так как, несмотря на низкую оценку по вычислительным характеристикам, он имеет лучшие оценки по конструкционным и эксплуатационным характеристикам, в то время

как комплексы ВК2 и ВК3 заметно уступают ему по этим параметрам.

При сравнении комплексов по показателю КК, полученному по шестой схеме агрегирования критериев, оказалось, что $BK1 > BK2 \approx BK3$, что согласуется с результатами сравнения комплексов по пяти критериям и сравнением по пятой схеме агрегирования критериев.

Итак, результаты выбора наиболее предпочтительного варианта комплекса, которые получены по двум иерархическим системам критериев с единственным показателем, построенным по пятой и шестой схемам, согласуются между собой и с оценками комплексов по пяти и трем критериям. Эти результаты имеют понятные объяснения. Напротив, две иерархические системы критериев с единственным показателем, построенные по третьей и четвертой схемам, дают результаты, которые различаются как между собой, так и отличаются от результатов оценки комплексов по пяти и трем критериям. В целом, по всем системам агрегирования критериев получаем качественно одинаковый результат: вычислительный комплекс ВК1 оказался наиболее предпочтительным.

Результаты апробации подтвердили эффективность разработанной технологии решения задач многокритериального выбора. Был найден самый перспективный вычислительный комплекс и дано объяснение полученного результата.

Заключение

Предложена новая технология ПАКС-М решения задач многокритериального выбора большой размерности, в котором процедуры снижения размерности пространства признаков используются в сочетании с различными методами принятия решений и/или их комбинациями. Важной особенностью технологии ПАКС-М является возможность сформировать несколько иерархических систем с различной степенью агрегирования критериев, решить исходную задачу выбора несколькими методами, дать понятное для ЛПР объяснение полученных результатов. Анализ результатов, полученных для разных иерархических систем агрегирования критериев, дает возможность ЛПР выбрать наиболее удобную систему критериев, либо совместно применять построенные системы критериев с целью повышения обоснованности сделанного выбора наиболее предпочтительного варианта.

При агрегировании критериев немаловажную роль играет установление семантических связей между исходными показателями и составными критериями. На пути к удовлетворительному решению ЛПР часто приходится сталкиваться с несогласованностью и противоречивостью получаемых результатов. Такие ситуации могут быть вызваны как неудачным объединением составных критериев, так и неудачным формированием градаций шкал составных критериев и интегрального показателя.

Технология ПАКС-М обладает определенной универсальностью, так как в общем случае позволяет оперировать как с символьной (качественной), так и с числовой (количественной) информацией. Привлекательной особенностью ПАКС-М является возможность использования в ней разнообразных методов принятия решений и технологий обработки информации. Отметим также, что вычислительный комплекс ВК1 оказался наиболее предпочтительным по совокупности своих характеристик по всем построенным системам агрегирования критериев. Это свидетельствует о достаточно высокой надежности предложенного подхода к многокритериальному выбору сложной системы.

Разработанная технология может быть применена в различных проблемных областях, где необходимо получить интегральный показатель оценки деятельности на основе исходной слабо структурируемой качественной информации. Одним из примеров успешного решения такой задачи может служить многоаспектная оценка результативности научных проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований [11].

Литература

1. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: правила и предубеждения. – Харьков: Гуманитарный центр, 2005.

Петровский Алексей Борисович. Заведующий лабораторией Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1967 году. Доктор технических наук, профессор. Автор более 150 печатных работ, в том числе 3-х монографий и 2-х учебников. Область научных интересов: дискретная математика, теория множеств, системный анализ, многокритериальный анализ решений, системы поддержки принятия решений, информационные технологии, научно-техническая политика, прогнозирование, планирование и организация научных исследований. E-mail: pab@isa.ru

Лобанов Василий Николаевич. Ведущий инженер ОАО «НИИ вычислительных комплексов им. М.А. Карцева». Окончил Московский инженерно-физический институт в 2003 году. Автор 10 печатных работ. Область научных интересов: многокритериальное принятие решений, проектирование вычислительных комплексов.

2. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. / Под ред. А.Б. Петровского. – М.: Наука, 2006.
4. Лобанов В.Н., Петровский А.Б. Выбор вычислительного кластера, основанный на агрегировании многих критериев. // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ, 2013, Вып.2, С.39-54.
5. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматлит, 2005.
6. Петровский А.Б. Пространства множеств и множеств. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
7. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009.
8. Петровский А.Б. Методы групповой классификации многопризнаковых объектов (части 1 и 2). // Искусственный интеллект и принятие решений, 2009, №3, С.3-14; №4, С.3-14.
9. Петровский А.Б., Лобанов В.Н. Многокритериальный выбор сложной технической системы по агрегированным показателям. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2013, № 3, С. 79-85.
10. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В. Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС. // Искусственный интеллект и принятие решений, 2012, № 4, С.88-103.
11. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В., Тихонов И.П., Балышев А.В. Многокритериальная оценка результативности научных проектов. // Третья Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии»: Труды конференции. – М.: ПолиПринтСервис, 2009, С.329-336.
12. Hwang C.L., Lin M.J. Group Decision Making under Multiple Criteria. – Berlin: Springer-Verlag, 1987.
13. Petrovsky A.B., Lobanov V.N. Selection of complex system in the reduced multiple criteria space. // World Applied Sciences Journal, 2014, Vol. 29, No. 10, P.1315-1319.