

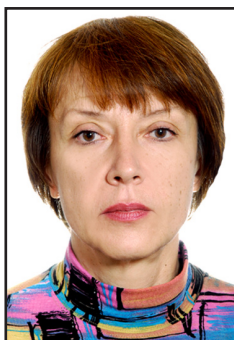


Методы прогнозирования перспективности коммерциализации изобретений*



Александр АНДРЕЙЧИКОВ
Alexander V. ANDREYCHIKOV

Ольга АНДРЕЙЧИКОВА
Olga N. ANDREYCHIKOVA



Евгений ТАБУНОВ
Evgeniy V. TABUNOV

*Андрейчиков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Андрейчикова Ольга Николаевна — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ЦЭМИ РАН, Москва, Россия.
Табунов Евгений Валерьевич — аспирант МИИТ, Москва, Россия.*

Methods of Forecasting Prospects of Inventions' Commercialization
(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 15)

Новые подходы к прогнозированию на основе систем поддержки принятия решений, математическим ядром которых являются метод анализа иерархий с динамическими суждениями и метод аналитических сетей, позволяющий определить приоритеты альтернатив в условиях взаимного влияния. Рассмотрены примеры прогнозирования перспектив систем рессорного подвешивания для высокоскоростного железнодорожного подвижного состава. Выявлены зависимости размерности информации и задач, связанных с оценкой сложных по своим последствиям решений.

Ключевые слова: управление, теория принятия решений, информация, критерии, последствия, интеллектуальные системы, прогнозирование, метод иерархий, метод аналитических сетей, высокоскоростной транспорт.

В задачах управления сложными системами, в состав которых входит человек, процессы принятия решений играют ключевую роль. Отличительными признаками таких систем являются непрерывное развитие и непредсказуемый характер возможных изменений состояния. Эти черты существенно влияют на постановку задач при принятии решений.

Традиционные многокритериальные задачи обычно сводятся к выбору лучшей альтернативы из множества допустимых или к упорядочиванию заданного конечного набора альтернатив. В развивающихся системах результат выбора лучшей альтернативы из некоторого конечного множества вариантов имеет динамический характер в связи с появлением новых критериев и альтернатив, а также из-за непостоянства предпочтений, которые отражают изменения, происходящие в системе. В таких системах трудно выделить

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-06-00225.

независимые элементы, поскольку активные участники (акторы), цели, критерии, альтернативы и т.п. оказывают влияние друг на друга. Кроме того, в системах, моделирующих социальные явления, могут возникать конфликты между участниками принятия решений.

ТРАДИЦИОННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Метод анализа иерархий (МАИ) [1] основан на представлении знаний экспертов в виде иерархии целей, факторов, действующих сил (акторов), критериев, подкритериев и альтернатив. Предпочтения экспертов выявляются с помощью процедуры парных сравнений элементов иерархии нижележащих уровней относительно связанных с ними элементов более высокого уровня. Для измерения степени предпочтительности используется шкала отношений.

Для каждой матрицы парных сравнений (МПС) вычисляется главный правый собственный вектор, который интерпретируется как вектор приоритетов сравниваемых объектов. Затем осуществляется линейная свертка приоритетов альтернатив на иерархии критериев, акторов и целей. Метод отличается простотой и дает хорошее соответствие интуитивным представлениям.

Сторонниками критериально-оптимизационного подхода [2] МАИ критикуется за то, что добавление новой альтернативы в набор, предъявляемый для выбора, может вызвать изменение порядка ранжированных ранее альтернатив. На самом деле критерии, используемые в МАИ, являются псевдокритериями, поэтому выбор лучших решений существенно зависит от предъявления. В МАИ для измерения качества альтернатив используется так называемая производная шкала, главная особенность которой то, что сумма приоритетов альтернатив по любому критерию равна единице. Оценки в производной шкале зависят не только от свойств сравниваемых альтернатив, но и от их количества. Следовательно, МАИ представляет собой пример псевдокритериального выбора, причем значение псевдокритерия относительное, что делает бессмысленным сравнение его абсолютных числовых значений. Выбор, осуществляемый в

МАИ, можно характеризовать только в терминах сохранения или изменения порядка ранжированных объектов при сужении или расширении предъявления.

Вычисление приоритетов в МАИ равноценно задаче распределения некоторого ресурса среди альтернатив, которое происходит пропорционально их предпочтительности. Вполне естественно, что это распределение зависит от количества и состава участников процесса. Появление новых альтернатив, впрочем, как и удаление, часто сопровождается изменением прежних предпочтений эксперта, заполняющего МПС.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА

Главные усовершенствования МАИ в данном случае направлены на расширение возможностей этого подхода и сводятся к применению различных принципов оптимальности; использованию различных способов оценивания объектов; проверке суждений экспертов на согласованность и непротиворечивость; выявлению и учету зависимостей между критериями.

Применение различных принципов оптимальности. В разработанном программном обеспечении реализованы различные принципы оптимальности при вычислении интегрального критерия [4]:

- традиционный критерий взвешенной суммы приоритетов

$$x^* = \arg \max_{x, x^k \in X} \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j w_j(x) \right], \text{ где } j=1, \dots,$$

n — количество критериев, α_j — весовой коэффициент j -го критерия; $w_j(x)$ — приоритет альтернативы x по j -му критерию;

- мультипликативный взвешенный критерий $x^* = \arg \max_{x, x^k \in X} \prod_j w_j^{\alpha_j}(x)$;

- максиминный критерий

$$x^* = \arg \max_{x, x^* \in X} \min_j w_j^{\alpha_j}(x).$$

Использование различных способов оценивания объектов. Одним из недостатков МАИ является большое количество требуемой от эксперта информации, которая представляет собой множество оценок предпочтительности, полученных в процессе парных сравнений альтернатив





и критериев. Метод имеет ограничение на количество одновременно сравниваемых объектов (не рекомендуется больше 9), поскольку известно, что человеку трудно осуществлять рациональный выбор, если число объектов выбора превышает 7 ± 2 . С целью устранения этого ограничения в разработанной системе предложены следующие средства: алгоритм уменьшения мощности множества альтернатив путем его кластеризации; оценка предпочтений с использованием шкалы лингвистических переменных; алгоритм увеличения мощности множества альтернатив путем добавления копий.

Проверка суждений экспертов на согласованность и непротиворечивость. При большом количестве альтернатив становится проблематичным формирование МПС, так как резко падает вероятность хорошей согласованности для матриц большой размерности. Для корректной работы МАИ нужно уменьшить количество одновременно сравниваемых объектов. К этому надо подойти, либо уменьшая исходное множество альтернатив X , либо постепенно увеличивая множество. Процедуры парных сравнений можно вообще избежать, применяя шкалу лингвистических переменных.

Выявление и учет зависимостей между критериями. Еще одно ограничение МАИ связано с независимостью критериев, находящихся на одном уровне иерархии. В иерархии учитываются отношения подчиненности (целое-часть, общее-частное) между критериями, находящимися на разных уровнях. Между критериями одного уровня не должны иметь места функциональные или близкие к ним связи. Требование взаимной независимости критериев является естественным для большинства формальных методов теории принятия решений (теория полезности, математическое программирование и т.д.). Отсутствие средств для выражения зависимостей одних критериев от других приводит иногда к противоречиям, которые возникают из-за того, что в список включаются зависящие друг от друга критерии. Поэтому при построении иерархической структуры и оценивании ее элементов желательно иметь средства, позволяющие отслеживать возможные противоречия. Для этого нужны

специальные знания о взаимных связях элементов иерархии. Такими средствами являются алгоритмы проверки поступающих от экспертов знаний на непротиворечивость, на удовлетворение принципу иерархической композиции, а также компонента извлечения знаний системы, которая позволяет определить наличие зависимостей между элементами иерархии.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАДАЧАМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Кроме традиционного подхода ранжирования конечного набора альтернатив по многим критериям для решения задач прогнозирования разработаны две СППР, позволяющие проводить ранжирование альтернатив с учетом изменяющихся во времени предпочтений (в том числе важности критериев) [3–5] и взаимного влияния целей, критериев, подкритериев и альтернатив.

Динамические предпочтения и приоритеты. Задача прогнозирования экспертных предпочтений связана с получением оценок приоритетности альтернатив в форме зависимостей от времени. Для этого исходные экспертные оценки должны содержать информацию об изменении предпочтительности одной альтернативы перед другой на некотором временном отрезке. Следовательно, оценка предпочтительности может быть задана не константой, а функцией. Подбор таких функций можно осуществить, либо предоставив в распоряжение эксперта некоторую функциональную шкалу [3], либо путем аппроксимации экспертных оценок, полученных в различные моменты времени [4, 5]. Эти функции отражают интуитивные чувства лица, принимающего решения об изменении в тренде: постоянном, линейном, логарифмическом и экспоненциальном, возрастающем до максимума и убывающем или опускающемся до минимума и возрастающем, колебательном и, наконец, допускающем катастрофические изменения.

Для динамических задач матрица парных сравнений содержит функции времени в качестве элементов, поэтому максимальное собственное число $\lambda_{\max}$, а также собственный вектор W будут зависеть от времени:

$$A(t)W(t) = \lambda_{\max}(t)W(t). \quad (1)$$

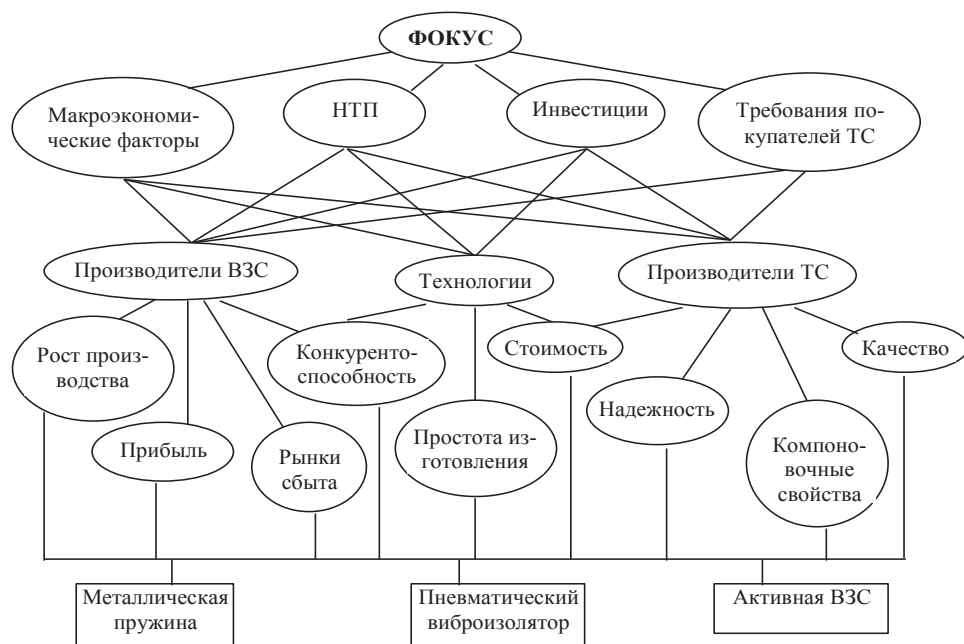


Рис. 1. Иерархия динамической задачи выбора перспективной ВЗС.

Здесь $A(t)$ – матрица парных сравнений объектов, содержащая информацию об изменении предпочтительности одной альтернативы перед другой на некотором промежутке времени, которая задана функцией.

Если порядок матрицы парных сравнений не превышает четырех, для уравнения (1) можно получить аналитическое решение [3]. Альтернативным способом является получение $A(t)$ и $W(t)$ численными методами [4, 5]. Для этого необходимо иметь в распоряжении информацию о предпочтениях экспертов за определенный период времени. При накоплении такой информации в разработанной компьютерной системе становятся возможными прогнозирование предпочтений и оценка ближайших последствий принимаемых решений.

Пример 1. Рассмотрим пример применения этого подхода к прогнозированию приоритетов перспективности коммерциализации альтернативных инновационных технологий для виброзащиты (ВЗС) высокоскоростного наземного транспорта (на ближайшие шесть лет). Иерархия факторов, действующих сил и критериев задачи представлены на рис. 1.

Главная цель задачи (фокус) – выбрать тип ВЗС, который будет предпочтительным для установки на высокоскоростных транспортных средствах (ТС) в течение установ-

ленного срока прогнозирования. Основные факторы, влияющие на предпочтения, размещены на первом уровне иерархии. Это – макроэкономика, научно-технический прогресс (НТП), инвестиции и требования покупателей транспортных средств, предъявляемые к виброзащите. На втором уровне иерархии расположены главные действующие силы – производители ВЗС, производители ТС и технологии производства ВЗС. Элементы данного уровня влияют на выбор типа ВЗС через определенные требования, выраженные критериями качества, составляющими третий уровень иерархии. На последнем уровне находятся альтернативные типы ВЗС.

На первом этапе решается статическая задача выбора лучшей из рассматриваемых альтернатив в настоящий момент времени t_0 .

На втором этапе с помощью экспертов определяются предпочтения, зависящие от времени. Это – суждения экспертов о предпочтительности факторов относительно главной цели и суждения о предпочтительности критериев для производителей ТС и ВЗС. В данном примере предполагалось, что предпочтения, высказанные экспертами для альтернатив по критериям третьего уровня иерархии, не будут изменяться с



Таблица 1

ФОКУС	Макроэкономика	НТП	Инвестиции	Требования покупателей
Макроэкономика	1	$1/0,25e^{0,6t}$	Auto	$1/(0,2-0,05t+0,08t^2)$
НТП	$0,25e^{0,6t}$	1	$0,2-0,18t+0,15t^2$	Auto
Инвестиции	Auto	$1/(0,2-0,18t+0,15t^2)$	1	Auto
Требования покупателей	$0,2-0,05t+0,08t^2$	Auto	Auto	1

Производители ВЗС	Прибыль	Рост производства	Конкуренто-способность	Рынки сбыта
Прибыль	1	$1/(0,2+0,05t+0,025t^2)$	$1/0,333e^{0,43t}$	$1/0,333e^{0,43t}$
Рост производства	$0,2+0,05t+0,025t^2$	1	Auto	Auto
Конкурентоспособность	$0,333e^{0,43t}$	Auto	1	Auto
Рынки сбыта	$0,333e^{0,43t}$	Auto	Auto	1

Производители ТС	Качество	Стоимость	Надежность	Компоновочные свойства
Качество	1	$0,333+0,4t+0,04t^2$	$3-1,15t+0,18t^2$	$0,333+0,15t$
Стоимость	$1/(0,333+0,4t+0,04t^2)$	1	Auto	Auto
Надежность	$1/(3-1,15t+0,18t^2)$	Auto	1	Auto
Компоновочные свойства	$1/(0,333+0,15t)$	Auto	Auto	1

течением времени. При заполнении динамических МПС эксперту достаточно выбрать вид и определить параметры для $(n-1)$ базовых функций, где n – размерность матрицы. Остальные (n^2-2n+1) значения предпочтений вычислялись автоматически на основе базовых значений (Auto), исходя из свойства обратной симметричности и предположения абсолютной согласованности суждений. Начальные значения предпочтений определялись по данным статической задачи.

Динамические матрицы парных сравнений имеют вид (табл. 1).

Полученные результаты показаны на рис. 2 и 3. Из рис. 2 видно, что важность научно-технических инноваций в будущем заметно возрастает. Приоритет требований покупателей увеличивается в течение срока прогнозирования немного слабее. Относительная значимость инвесторов и макроэкономических факторов снижается в будущем. Такой прогноз можно считать достаточно оптимистическим. Он соответствует тенденциям стабильного экономического роста.

Глобальные динамические приоритеты альтернатив, вычисленные с учетом описанных изменений предпочтений (рис. 3), наглядно демонстрируют возрастание

предпочтительности производства сложной и конкурентоспособной продукции (активная и пневматическая ВЗС) перед простой и дешевой (пружинная ВЗС) в будущем. Невысокий приоритет пневматических ВЗС в данном случае объясняется относительно высокой стоимостью и низкой надежностью систем этого класса.

Таким образом, принимая долгосрочные решения, важно учитывать тенденции изменения предпочтений с течением времени. Эти тенденции можно выявить на основе релевантных статических данных. Если таковые отсутствуют, то динамические задачи могут быть решены на основе обоснованных гипотез об изменении предпочтений.

Проблема взаимного влияния. Аксиоматические методы теории полезности [6, 7] основаны на взаимной независимости критериев и альтернатив. Новая парадигма принятия решений с зависимостью и обратной связью сформулирована в работе [3], в которой предлагается представлять сложную проблему иерархической или сетевой структурой, элементы которой могут влиять друг на друга.

Метод анализа сетей позволяет установить тенденции изменения приоритетов элементов в системе относительно задан-



Рис. 2. Изменение приоритетов факторов относительно фокуса во времени:
1 – макроэкономика, 2 – НТП, 3 – инвесторы, 4 – требования покупателей.

ной цели и определить предельные значения этих приоритетов. Предельные приоритеты можно интерпретировать как приоритеты элементов системы в будущем, то есть как возможный прогноз для случая, когда высказанные предпочтения будут оставаться неизменными в течение срока прогнозирования.

В методе анализа сетей элементы задачи принятия решений объединяются в кластеры, между которыми возможны произвольные связи. Формирование кластеров и связей является неформальной процедурой и осуществляется экспертами и ЛПР (лицо, принимающее решение) на основе знаний о специфике решаемой задачи. Объединение элементов в кластеры позволяет снизить размерность задачи и улучшить согласованность суждений. Следующим этапом становится построение матриц парных сравнений для кластеров и их элементов. При этом экспертами оценивается интенсивность влияния одних кластеров (элементов) на другие. Главные собственные векторы МПС интерпретируются как векторы приоритетов сравниваемых объектов. Из главных собственных векторов, вычисленных для элементов кластеров, формируется суперматрица. Для нормирования ее столбцов используются векторы приоритетов кластеров.

Суперматрица сетевой задачи приводится к стохастическому виду путем умно-

жения на матрицу весовых коэффициентов кластеров. Возведение стохастической матрицы в высокие степени позволяет получить решение задачи о предельном вкладе каждого кластера в заданную цель (предельные приоритеты воздействия).

Таким образом, способ вычисления приоритетов воздействия зависит от структуры связей элементов задачи. Формирование структуры – сложный процесс, который может приводить к различным результатам. Этот процесс требует глубоких знаний проблемной области и рассмотрения множества вариантов. Для обеспечения такой возможности необходима компьютерная и информационная поддержка.

Пример иерархической структуры, содержащей три уровня, приведен на рис. 4а. Если акторы, критерии и альтернативы влияют друг на друга, то иерархия превращается в сеть, один из возможных вариантов которой показан на рис. 4б.

Результаты, полученные с учетом взаимного влияния элементов проблемы, могут отличаться от результатов иерархической композиции приоритетов. Иерархический подход позволяет определить лучшую альтернативу на момент принятия решения. Взаимное влияние элементов решения вызывает изменение приоритетов, поэтому в данном случае предельный результат можно рассматривать как про-



Рис. 3. Изменение глобальных приоритетов альтернатив во времени: 1 – пружинная ВЗС, 2 – пневматическая ВЗС, 3 – активная ВЗС.



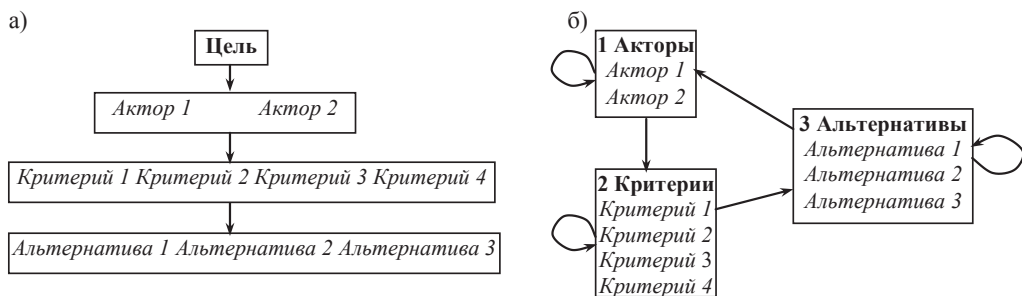


Рис. 4. Примеры структур задач принятия решений: а) иерархия; б) сеть.

гноз, который показывает, какая альтернатива будет наилучшей в будущем.

Пример 2. Рассмотрим применение метода аналитических сетей для выбора виброзащитной технологии (ВЗС) высокоскоростного наземного транспорта, которая будет перспективной для производства на ближайшие шесть лет.

Основные факторы и действующие силы для рассматриваемой проблемы представлены на рис. 5. Кроме альтернативных вариантов технологии учитывается влияние производителей ВЗС, производителей ТС, покупателей ТС, инвесторов, технологий производства ВЗС, макроэкономических факторов и научно-технических достижений в данной обла-

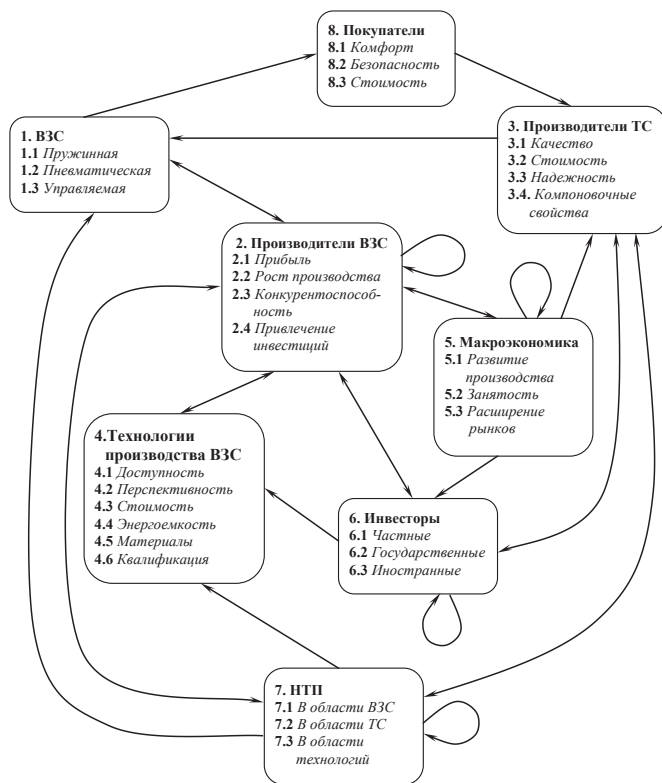
сти. Стрелки на рис. 5 указывают направления влияния.

Задача принятия решений включает 29 элементов, которые объединены в восемь кластеров. Первый кластер содержит альтернативные варианты ВЗС, предложенные для производства.

Полученные приоритеты кластеров используются в качестве весовых коэффициентов в процедуре приведения суперматрицы к стохастическому виду.

В процессе формирования стохастической суперматрицы необходимо заполнить 90 матриц парных сравнений элементов кластеров, подверженных влиянию, по каждому из элементов влияющих кластеров. Векторы приоритетов, вычисленные

Рис. 5. Структура сетевой задачи прогнозирования перспективных ВЗС.



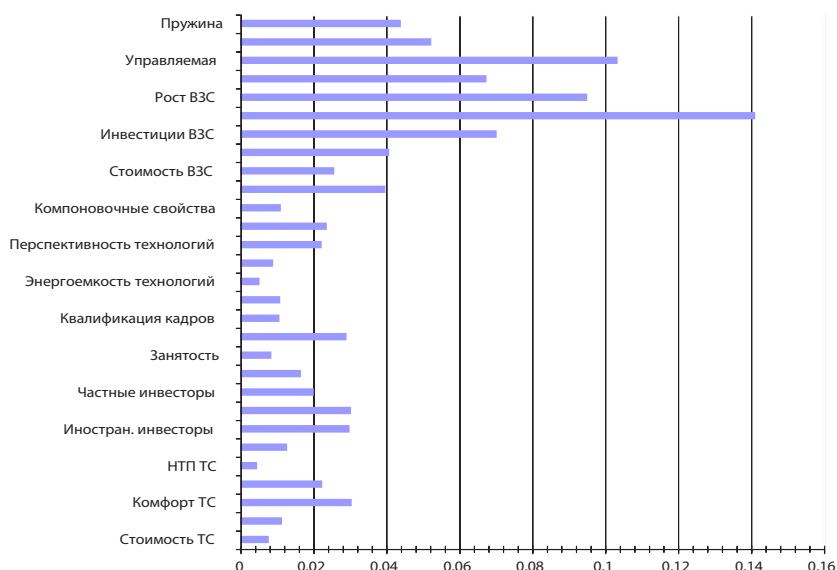


Рис. 6. Значения предельных приоритетов w^p элементов проблемы выбора перспективной для производства ВЗС.

для этих матриц, записываются в соответствующие блоки суперматрицы.

Все матрицы имеют хорошие оценки согласованности, что характеризует последовательность суждений эксперта.

Последовательное возведение полученной суперматрицы в целочисленные степени помогает получить не изменяющийся при дальнейшем увеличении степени вектор предельных приоритетов влияния w^p , приведенный на рис. 6.

Полученные результаты позволяют считать управляемую ВЗС наиболее перспективной для производства в будущем. Пневматические рессоры занимают второе место, а пружинные — последнее. Отрыв лидирующей системы от остальных — довольно значительный. Следовательно, если высказанные экспертами предпочтения не будут существенно изменяться в течение срока прогнозирования, то при существующих взаимосвязях между элементами задачи лучшими для производства будут управляемые ВЗС.

Наиболее значительное влияние на выбор перспективной для производства ВЗС оказывают цели производства, особенно конкурентоспособность выпускаемой продукции. Затем следует тип ВЗС (см. рис. 6). На третьем месте находятся требования производителей ТС к ВЗС. Среди них главными являются качество виброзащиты

и надежность. Примерно одинаковое влияние на выбор перспективных систем виброзащиты оказывают параметры технологий и инвесторы. Влияние государственных и иностранных инвесторов более значимо по сравнению с частными. Среди технологических факторов важнейшими выступают доступность и перспективность технологий. Невысокое по сравнению с перечисленными факторами влияние макроэкономических показателей можно объяснить психологическими особенностями экспертов, которые не склонны к катастрофическим прогнозам. Порядок приоритетности влияния макроэкономических факторов является очевидным.

Влияние требований покупателей ТС, связанных с виброзащитой, также невелико, главный из них — комфорт.

Факторы научно-технического прогресса имеют наименьшее суммарное влияние на заданную цель по сравнению с остальными элементами задачи. Самое существенное направление — технологии производства ВЗС.

Полученные результаты хорошо согласуются с интуитивными представлениями экспертов, достаточно легко интерпретируются и позволяют получить подробное обоснование прогноза. Промежуточные результаты также представляют интерес, так как дают возможность проанализиро-



вать вероятные взаимодействия элементов системы. По сравнению с традиционными моделями динамических систем в виде дифференциальных уравнений рассмотренный подход имеет некоторые преимущества: облегчает доступ к качественной информации при построении модели; для него характерны отсутствие проблемы определения значений параметров динамических моделей и проблемы поиска начальных приближений; значительная экономия времени.

СППР И ПРОГНОЗ

Система поддержки принятия решений для задач прогнозирования разработана на основе методов анализа иерархий и сетей. Она располагает разнообразными способами исследования сложных систем в условиях неопределенности и может использоваться для поддержки принятия решений, стратегического планирования и прогнозирования. СППР включает базу данных, широкий набор процедур обработки экспертных предпочтений, а также блок методов статистического анализа данных, предназначенный для извлечения знаний. Знания применяются при решении задач прогнозирования, оценке взаимоотношений между критериями и другими элементами иерархии, проверке экспертных суждений на непротиворечивость. Наличие знаний и механизмов для их обработки позволяет назвать разработанную систему интеллектуальной. У нее широкий спектр задач прогнозирования и аналитического планирования в таких предметных областях, как экономика, инноватика, образование [8–11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие общества приводит к изменению задач управления сложными антропогенными системами, где важнейшую роль играют процессы принятия решений. Появление при этом новых подходов обусловлено:

— увеличением количества информации для принятия решений;

— привлечением все большего числа участников, коллективным характером процессов принятия сложных решений;

— необходимостью всесторонней оценки их возможных последствий;

— развитием вычислительных средств и теории принятия решений.

Увеличение количества информации приводит к увеличению размерности задач при принятии решений. Кроме того, возникает необходимость в предварительном анализе и структурировании информации. Причем наиболее актуальные задачи, связанные с СППР, относятся к области слабо-структурированных проблем, для решения которых требуются интеллектуальные системы, способные накапливать информацию, извлекать из нее знания и применять их соответственно целям (в том числе прогностическим).

ЛИТЕРАТУРА

1. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.
2. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах. — М.: Логос, 2000. — 296 с.
3. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 368 с.
4. Saaty T. L. Decision Making With Dependence And Feedback: The Analytic Network Process, Pittsburgh: RWS Publications, 2001. — 370 p.
5. Andreichicov A. V., Andreichicova O. N. A choice of a perspective system for vibration isolation in conditions of varying environment, Proceedings of the Sixth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process ISAHF'2001, Bern, Switzerland, 2001, pp. 13–24.
6. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: Предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
7. Нейман Дж. фон, Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970. — 708 с.
8. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: Основы стратегического инновационного менеджмента и маркетинга. — М.: Либроком, 2011. — 248 с.
9. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: Концептуальное проектирование инновационных систем. — М.: Либроком, 2013. — 432 с.
10. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Стратегический менеджмент в инновационных организациях. Системный анализ и принятие решений. — М.: Инфра-М, 2013. — 396 с.
11. Андрейчиков А. В., Марков Д. С., Асташкина Л. А. Интеллектуальная система для стратегических решений // Мир транспорта. — 2014. — № 5. — С. 130–145.

Координаты авторов: **Андрейчиков А. В.** — Andreichickov@mail.ru, **Андрейчикова О. Н.** — Alexandrol@mail.ru, **Табунов Е. В.** — +7 (495) 684–29–06.

Статья поступила в редакцию 08.06.2015, принята к публикации 16.10.2015.

METHODS OF FORECASTING PROSPECTS OF INVENTIONS' COMMERCIALIZATION*

Andreychikov, Alexander V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Andreychikova, Olga N., CEMI of RAS, Moscow, Russia.
Tabunov, Evgeny V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

New approaches are given to forecasting based on decision support systems, the mathematical core of which is analytic hierarchy process with dynamic judgments and analytical networks method, allowing to prioritize alternatives in terms

of mutual influence. Examples of forecasting prospects for spring suspension systems for high-speed rolling stock are considered. The dependences of dimension of information and tasks related to assessment of decisions complex on their consequences are identified.

Keywords: management, decision theory, information, criteria, consequences intelligent systems, forecasting, analytic hierarchy process, analytical networks method, high-speed transport.

Background. In tasks of managing complex systems, which include a person, decision-making processes play a key role. The distinctive features of these systems are continuous development and unpredictable nature of possible changes in the state. These features significantly affect formulation of tasks in decision-making.

Traditional multi-criteria tasks are usually boiled down to a choice of the best alternative from the set of admissible ones or to ordering a given finite set of alternatives. In developing systems result of choosing the best alternative out of a finite set of options is dynamic due to emergence of new criteria and alternatives, as well as variability of preferences, which reflect changes in the system. In such systems, it is difficult to identify independent elements as active participants (actors), objectives, criteria, alternatives, etc. influence each other. Furthermore, in systems that simulate social phenomena, conflicts may arise between participants of decision-making process.

Objective. The objective of the authors is to consider methods, used to forecast prospects of inventions' commercialization.

Methods. The authors use general scientific methods, comparative analysis, analytic hierarchy process and analytical networks method.

Results.

Traditional analytic hierarchy process

Analytic hierarchy process (hereinafter – AHP) [1] is based on representation of expert knowledge in the form of a hierarchy of objectives, factors, acting forces (actors), criteria, sub-criteria and alternatives. Preferences of experts are identified by the procedure of paired comparisons of elements of the hierarchy of the lower levels relative to related items of higher levels. To measure preference degree ratio scale is used.

For each pairwise comparisons matrix (hereinafter – PCM) principal right eigenvector is calculated, which is interpreted as a vector of priorities of compared objects. Then, linear convolution of priorities of alternatives on hierarchy of criteria, objectives and actors is performed. The method is simple and gives a good match with intuitions.

Proponents of criterion-optimization approach [2] criticize AHP for the fact that addition of a new set of alternatives presented for selec-

tion can cause changes in the order of previously ranked alternatives. In fact, criteria used in AHP are pseudocriteria, so the choice of the best solutions essentially depends on presentation. In AHP to measure the quality of alternatives a so-called derive scale is used, the main feature of which is that the sum of priorities of alternatives by any criterion is equal to one. Rankings in the derived scale depend not only on the properties, compared alternatives, but also on their quantity. Consequently, AHP is an example of pseudocriterial choice and value of pseudocriterion is relative, making it pointless to compare its absolute numerical values. Choice in AHP can be described only in terms of maintaining or changing the order of ranked objects by narrowing or expanding the presentation.

Calculation of priorities in AHP is equivalent to the task of distribution of some resource among alternatives, which occurs in proportion to their preference. It is natural that this distribution depends on the number and composition of participants. The emergence of new alternatives, however, as well as removal, is often accompanied by a change in former preferences of an expert, filling PCM.

Improvement of the method

Major improvements in AHP in this case are aimed at strengthening the capacity of this approach and are reduced to the use of different optimality principles; the use of different methods of object evaluation; verification of expert judgments by coherence and consistency; identification and accounting of dependencies between criteria.

The use of different optimality principles. In developed software various optimality principles in the calculation of the integral criterion are implemented [4]:

- traditional criterion of a weighted sum of priorities

$$x^* = \arg \max_{x, x^* \in X} \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j w_j(x) \right],$$

where $j=1, \dots, n$ is a number of criteria, α_j is weighing coefficient of the j -th criterion; $w_j(x)$ is priority of the alternative x by the j -th criterion;

* The research was supported by RFBR, project № 14-06-00225.



- *multiplicative weighted criterion* $x^* = \arg \max_{x, x^* \in X} \prod_j w_j^{a_j}(x)$;
- *maximin criterion* $x^* = \arg \max_{x, x^* \in X} \min_j w_j^{a_j}(x)$.

The use of different methods of object evaluations. One of the drawbacks of AHP is a large amount of information required from experts, which is a set of preference assessments obtained in the course of pairwise comparisons of alternatives and criteria. The method has a limit on the number of objects to be compared at the same time (not recommended for more than 9), since it is known that the person finds it difficult to carry out a rational choice if the number of objects of selection exceeds 7 ± 2 . In order to eliminate this restriction in the developed system the following means are offered: an algorithm for reducing cardinality of the set of alternatives through its clustering; evaluation of preferences using a scale of linguistic variables; ability to increase capacity of a set of alternatives by adding copies.

Checking the judgment of experts on coherence and consistency. With a large number of alternatives formation of PCM becomes problematic, as probability of good consistency for matrices of large dimension drops sharply. For correct operation of AHP it is necessary to reduce the number of simultaneously compared objects. To this we must go, either reducing the original set of alternatives X , or gradually increasing the set. Procedures for pairwise comparisons can be avoided altogether by using a scale of linguistic variables.

Identification and accounting of dependencies between criteria. Another limitation of AHP is associated with independence of criteria, which are located at the same level of hierarchy. In the hierarchy subordination relations are taken into account (whole-part, general-private) between the criteria at different levels. Between one level criteria functional or close to them relations should not take place. The requirement for mutual independence of criteria is natural for most formal methods of decision theory (utility theory, mathematical programming, etc.). The lack of means to express dependencies of some criteria on other sometimes leads to contradictions that arise from the fact that criteria independent of each other are included in the list. Therefore, when constructing a hierarchical structure and evaluating its elements, it is desirable to have means to monitor possible conflicts. This requires special knowledge of mutual relations between elements of the hierarchy. These means are checking algorithms of an expert's knowledge for consistency, of satisfying the principle of hierarchical composition, as well as component of system knowledge extraction that allows to determine existence of dependencies between elements of the hierarchy.

New approaches to forecasting issues

In addition to the traditional approach of ranking finite set of alternatives on many criteria to solve tasks of forecasting two DSS are developed, which allow to rank alternatives based on time-varying preferences (including importance of

criteria) [3–5], and mutual influence of objectives, criteria, sub-criteria and alternatives.

Dynamic preferences and priorities. The task of forecasting expert preferences is related with obtaining estimates of alternatives priority in the form of time dependencies. For this, initial expert assessments should contain information about changing preference of one alternative over another at some point in time. Therefore, preference evaluation may be set not to a constant, but to a function. Selection of these functions can be done by either providing to the expert a functionality scale [3], or by fitting expert estimates obtained at different times [4, 5]. These features reflect the intuitive sense of the decision-maker on changes in the trend: constant, linear, logarithmic and exponential, increasing to a maximum and decreasing or lowering to a minimum and increasing, vibrational and finally allowing catastrophic changes.

For dynamic tasks the matrix of pairwise comparisons contains time functions as elements, so the maximum eigenvalue $\lambda_{\max}$ and the eigenvector W will also depend on time:

$$A(t)W(t) = \lambda_{\max}(t)W(t). \quad (1)$$

Here $A(t)$ is a matrix of pairwise comparisons of objects containing information about the change of preference of one alternative over the other at a time interval that is specified by a function.

If the order of the matrix of paired comparisons does not exceed four for the equation (1) it is possible to obtain an analytical solution [3]. An alternative method is to obtain $A(t)$ and $W(t)$ numerically [4, 5]. To do this, it is necessary to have information about preferences of experts for a certain period of time. When accumulating such information in a developed computer system preference forecasting and assessment of immediate consequences of made decisions become possible.

Example 1. Let's consider the example of applying this approach to forecasting priorities of prospects of commercialization of alternative of innovative technologies for vibration protection (VP) of high-speed ground transport (for the next six years). Hierarchy of factors, acting forces and criteria of tasks are presented in Pic. 1.

The main objective of the task (focus) is to choose a type of VP that will be advantageous for installation on high-speed transport vehicles (TV) within the prescribed forecasting period. The main factors influencing preferences, are located at the first level of the hierarchy. They are macroeconomics, scientific and technical progress (STP), investment and requirements of buyers of transport vehicles for vibration protection. At the second level of the hierarchy protagonists forces are located – VP manufacturers, TV manufacturers and VP production technologies. Elements of this level influence the choice of VP type through specific requirements expressed by quality criteria that make up the third level of the hierarchy. At the last level, there are alternative types of VP.

At the first stage static task of selecting the best of the considered alternatives at present point in time t_0 is decided.

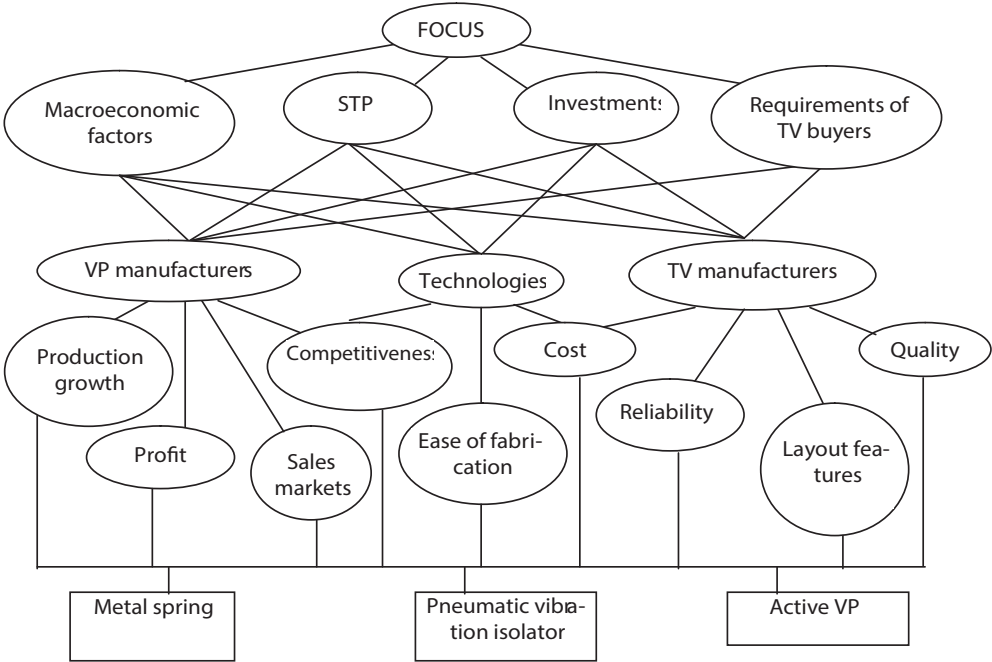
At the second stage with the help of experts

Table 1

FOCUS	Macroeconomics	STP	Investments	Requirements of buyers
Macroeconomics	1	$1/0.25e^{0.6t}$	Auto	$1/(0.2-0.05t+0.08t^2)$
STP	$0.25e^{0.6t}$	1	$0.2-0.18t+0.15t^2$	Auto
Investments	Auto	$1/(0.2-0.18t+0.15t^2)$	1	Auto
Requirements of buyers	$0.2-0.05t+0.08t^2$	Auto	Auto	1

Manufacturers of VP	Profit	Production growth	Competitiveness	Sales markets
Profit	1	$1/(0.2+0.05t+0.025t^2)$	$1/0.333e^{0.43t}$	$1/0.333e^{0.43t}$
Production growth	$0.2+0.05t+0.025t^2$	1	Auto	Auto
Competitiveness	$0.333e^{0.43t}$	Auto	1	Auto
Sales markets	$0.333e^{0.43t}$	Auto	Auto	1

Manufacturers of TV	Quality	Cost	Reliability	Layout features
Quality	1	$0.333+0.4t+0.04t^2$	$3-1.15t+0.18t^2$	$0.333+0.15t$
Cost	$1/(0.333+0.4t+0.04t^2)$	1	Auto	Auto
Reliability	$1/(3-1.15t+0.18t^2)$	Auto	1	Auto
Layout features	$1/(0.333+0.15t)$	Auto	Auto	1



Pic. 1. The hierarchy of dynamic task to select perspective VP.

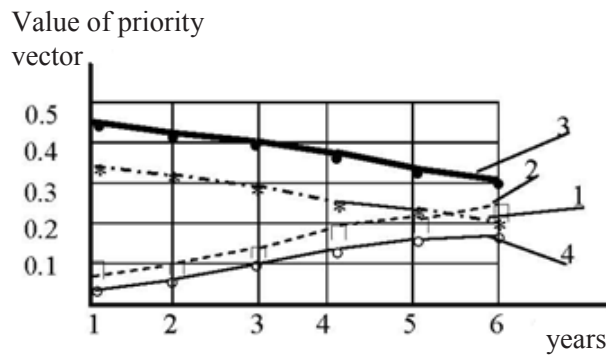
preferences are determined, which depend on time. They are expert judgments on preference of factors relative to the main purpose and judgment on the preference of criteria for manufacturers of TV and VP. This example assumes that preferences expressed by experts for alternatives by criteria of the third level of the hierarchy, will not change over time. When filling out dynamic PCM expert can simply choose a form and define parameters for $(n-1)$ basic functions, where n is dimension of the matrix. The rest (n^2-2n+1) values of preference

were calculated automatically based on the basic values (Auto), based on the reverse symmetry properties and assumptions of the absolute consistency of judgment. The initial values of preferences were determined according to data of the static task.

Dynamic matrices of paired comparisons have a form shown in Table 1.

The results are shown in Pic. 2 and 3. Pic. 2 shows that the importance of scientific and technological innovation in the future will significantly





Pic. 2. Change in priority factors relative to focus over time:
1 – macroeconomics, 2 – STP, 3 – investors, 4 – requirements of buyers.

increase. Priority of requirements of buyers increases during the term of prediction slightly weaker. The relative importance of investors and macroeconomic factors reduces in the future. This forecast can be considered rather optimistic. It is consistent with the trends of stable economic growth.

Global dynamic priorities of alternatives, calculated taking into account these changes of preferences (Pic. 3), demonstrate an increase in the preference of production of complex and competitive products (active and pneumatic VP) to simple and cheap (spring VP) in the future. Low priority of pneumatic VP in this case is explained by relatively high cost and low reliability of systems of this class.

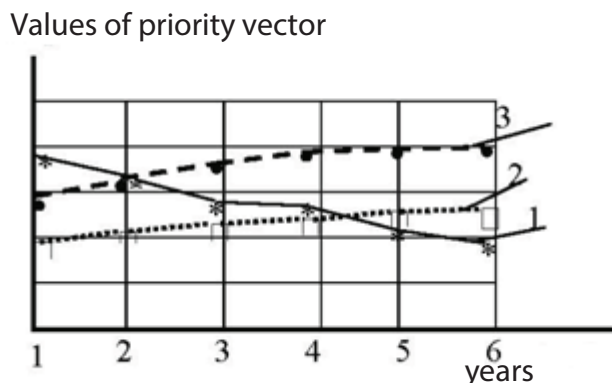
Thus, making long-term decisions, it is important to take into account trends in preferences changes over time. These trends can be identified on the basis of relevant static data. If any are missing, dynamic tasks can be solved on the basis of reasonable hypotheses about changing preferences.

The problem of mutual influence. Axiomatic methods of utility theory [6, 7] are based on mutual independence of criteria and alternatives. The new paradigm of decision-making with dependence and reverse relation is formulated in [3],

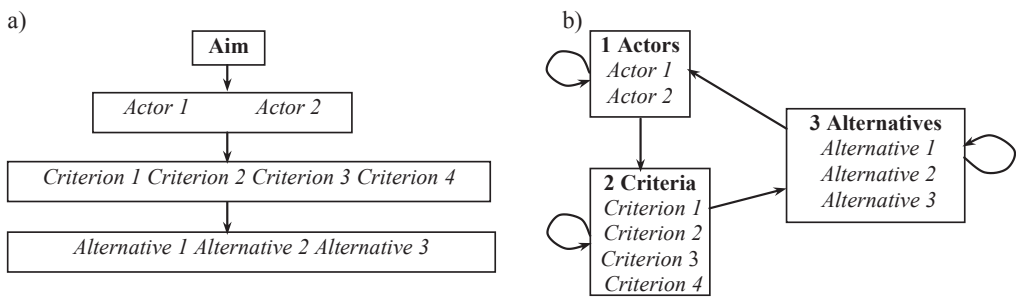
which proposed to present a difficult problem as a hierarchical or network structure, elements of which may affect each other.

The method of network analysis allows to set trends in the changes in priorities of elements in the system with respect to the intended target and define limits of these priorities. Limit priorities can be interpreted as priorities of system elements in the future, that is, as a possible prognosis for the case where the expressed preferences will remain unchanged during the forecasting term.

In the method of network analysis elements of decision making task are clustered between which arbitrary connections are possible. Formation of clusters and linkages is an informal procedure and is carried out by experts and decision-makers (decision maker) on the basis of knowledge about the specific problem to be solved. Combining elements into clusters reduces the dimension of the task and improves consistency of judgments. The next stage is the construction of a matrix of pairwise comparisons for clusters and their components. The experts evaluate intensity of the influence of some clusters (items) on the other. The main eigenvectors of PCM are interpreted as vectors of priorities of compared objects. Of the main eigenvectors computed for the elements of clusters supermatrix is formed. For normalization of the columns vectors of priority of



Pic. 3. Change in global priorities of alternatives over time: 1 – spring VP, 2 – pneumatic, 3 – active VP.



Pic. 4. Examples of structures of decision-making tasks: a) hierarchy; b) network.

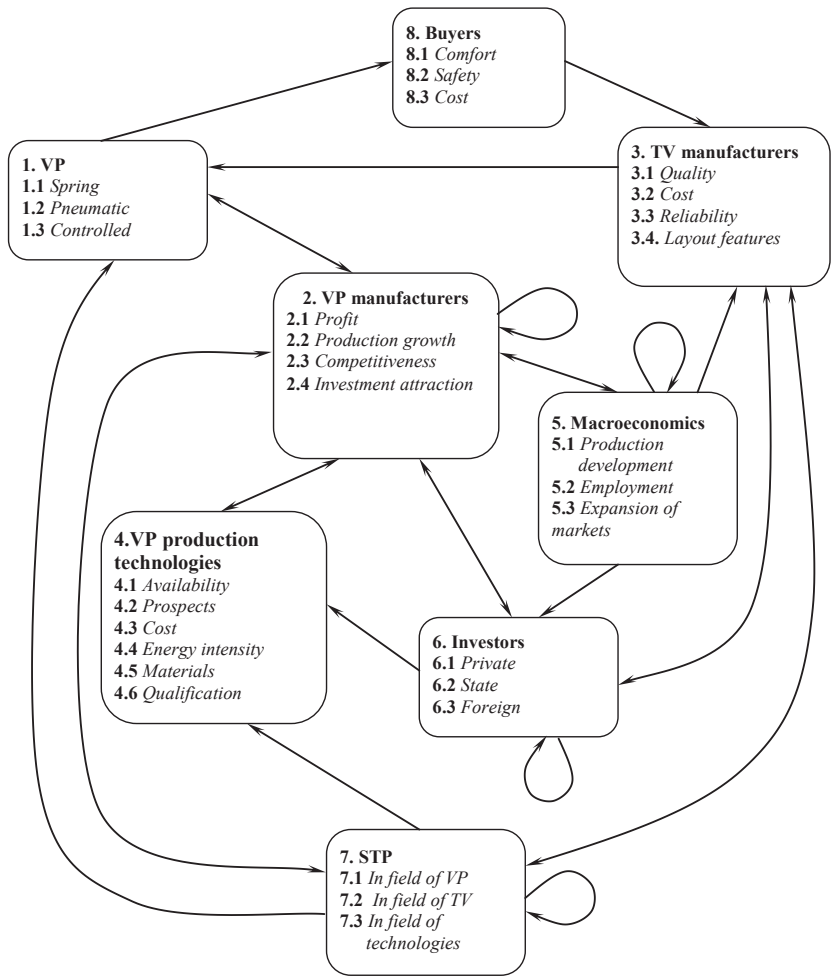
clusters are used.

Supermatrix of network task is reduced to stochastic form by multiplying weighting coefficients of clusters by the matrix. Raising a stochastic matrix to high degrees provides a solution to the task of limiting contribution of each cluster in a given target (utmost exposure priorities).

Thus, the method of calculating exposure pri-

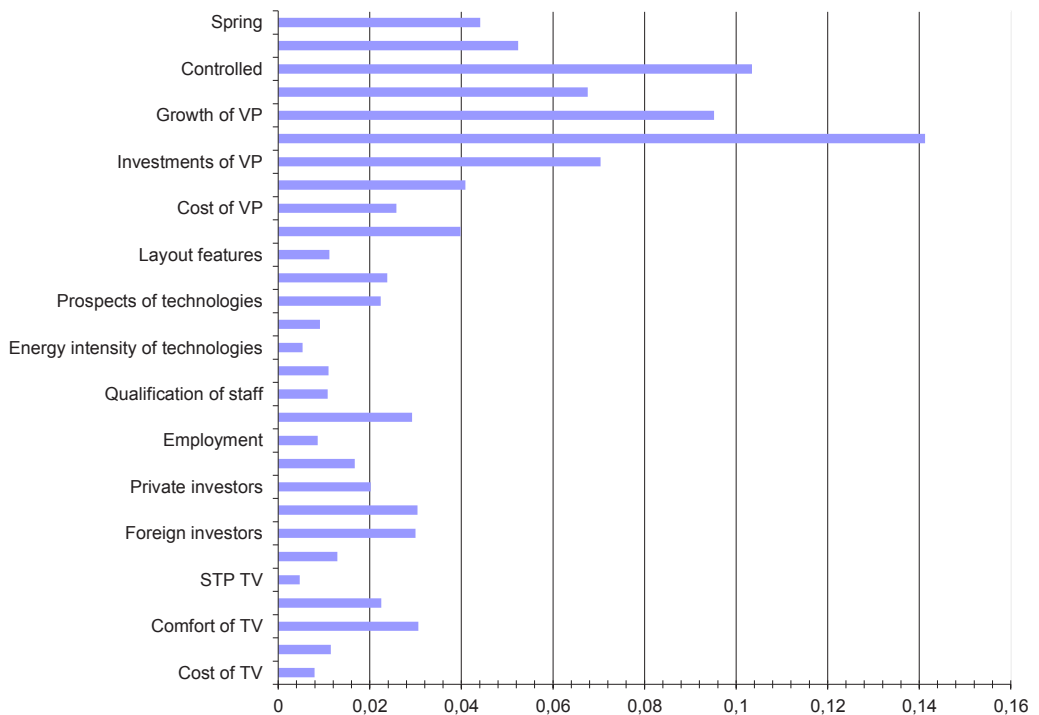
orities depends on the structure of links of elements of the problem. Formation of the structure is a complex process that can lead to different results. This process requires deep knowledge of subject area and consideration of a variety of options. To provide this capability the computer and information support is required.

Example of hierarchical structure comprising



Pic. 5. Structure of network task to forecast promising VP.





Pic. 6. The values of limiting priorities w^* of elements of the problem to choose VP promising for production.

three layers is shown in Pic. 4a. If actors, criteria and alternatives influence each other, then the hierarchy is transformed into a network, one possible embodiment of which is shown in Pic. 4b.

The results obtained by taking into account mutual influence of elements of the task, may differ from the hierarchical composition of priorities. Hierarchical approach allows to determine the best alternative at the time of decision-making. The mutual influence of elements of the decision causes a change in priorities, so in this case the maximum result can be regarded as a forecast that shows which alternative would be best in the future.

Example 2. Let's consider the application of analytical network method to select vibration protection technology (VP) of high-speed ground transport which will be promising for the production of the next six years.

Key drivers and operating forces for considered task are shown in Pic. 5. In addition to the alternative options of technologies the effect of VP manufacturers, TV manufacturers, TV buyers, investors, VP production technologies, macroeconomic factors and scientific and technological achievements in this field are taken into account. The arrows in Pic. 5 indicate the direction of influence.

The task of decision-making includes 29 elements, which are combined into eight clusters. The first cluster contains alternatives of VP proposed for production.

These priorities of clusters are used as weighting factors in the process of bringing supermatrices to stochastic form.

In the process of formation of stochastic supermatrices it is necessary to complete 90 paired comparisons matrix of elements of clusters, which are exposed, for each of the elements affecting clusters. Priority vectors calculated for these matrices are written into corresponding blocks of supermatrix.

All matrices have good assessment of coherence that characterizes the sequence of expert judgment.

Sequential raising of obtained supermatrix to integer degrees helps to get not changing with increasing degree vector of marginal influence priority w^* , shown in Pic. 6.

The results allow to consider a controlled VP the most promising for production in the future. Air springs are in the second place, and spring is the last one. Breakdown of the leading system of the rest is quite significant. Therefore, if the preference expressed by experts does not change significantly over the forecasting period, then in the presence of relationship between elements of the task the best option for production will be controlled VP.

The most significant influence on the choice of perspective for the production VP belongs to production targets, especially competitiveness of its products. This is followed by the type of VP (see Pic. 6). In the third place there are requirements of TV manufacturers for VP. Among them the main are quality of vibration protection and reliability. About the same impact on the choice of advanced systems of vibration protection belongs to technology parameters and investors. Impact of state and foreign investors is more important than of private.

Among the technological factors the most important are availability and prospects of technologies. Low in comparison with aforementioned factors influence of macroeconomic indicators can be explained by psychological characteristics of experts who are not prone to catastrophic forecasts. The order of priority of the impact of macroeconomic factors is obvious.

Influence of requirements of TV buyers associated with vibration protection, is also small, the main among them is comfort.

Factors of scientific and technological progress have the least total impact on given target compared with the rest elements of the task. The most significant direction is VP production technologies.

The results are concerted with the intuitive ideas of experts, easy enough to be interpreted and give a detailed justification for the forecast. Interim results are also of interest, since they make it possible to analyze the possible interaction between system elements. Compared to traditional models of dynamic systems in the form of differential equations considered approach has several advantages: it facilitates access to quality information when building the model; it is characterized by the absence of the problem of determining the parameters of dynamic models and the problem of finding the initial approximations; significant time savings.

DSS and forecast

Decision support system for forecasting tasks is based on the methods of analysis of hierarchies and networks. It offers a variety of research studies of complex systems in the face of uncertainty, and can be used for decision support, strategic planning and forecasting. DSS includes a database, a set of procedures for processing of expert preferences, as well as a block of statistical data analysis methods for extracting knowledge. Knowledge is used in solving problems of forecasting, assessment of relations between criteria and other elements of the hierarchy, checking consistency of expert judgment. Presence of knowledge and tools to process them allows to call the developed system intellectual. It has a wide range of problems of forecasting and analytical planning in such subject areas as economics, innovation, education [8–11].

Conclusion. The development of society leads to changes in the tasks of managing complex man-made systems where the crucial role is played by the processes of decision-making. The appearance of new approaches is justified by:

- Increasing the amount of information of decision-making;
- Involvement of an increasing number of participants, collective nature of making complex decisions;

- The need for comprehensive assessment of their possible consequences;
- Development of computational tools and decision theory.

Increase in the amount of information increases the dimension of tasks of decision-making. Furthermore, there is a need for preliminary analysis and structuring information. And the most crucial problems related to DSS belong to the field of semi-structured problems to solve which intelligent systems are required that can store information, extract knowledge and apply it to respective targets (including predictive ones).

REFERENCES

1. Saaty, T. L. Decision-making. Hierarchy analysis method. Moscow, Radio i svjaz' publ., 1989, 316 p.
2. Larichev, O. I. Theory and methods of decision-making, as well as the Chronicle in Magical Lands [*Teorija i metody prinjatija reshenij, a takzhe Hronika sobytij v Vol'shebnyh Stranah*]. Moscow, Logos publ., 2000, 296 p.
3. Andreichikov, A. V., Andreichikova, O. N. Analysis, synthesis, planning of decisions in the economy [*Analiz, sintez, planirovanie reshenij v ekonomike*]. Moscow, Finansy i statistika publ., 2004, 368 p.
4. Saaty, T. L. Decision Making With Dependence And Feedback: The Analytic Network Process, Pittsburgh: RWS Publications, 2001, 370 p.
5. Andreichikov, A. V., Andreichikova, O. N. A choice of a perspective system for vibration isolation in conditions of varying environment, Proceedings of the Sixth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process ISAHP'2001, Bern, Switzerland, 2001, pp. 13–24.
6. Keeney, R. L., Raiffa, H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Moscow, Radio i svjaz' publ., 1981, 560 p.
7. Neumann, J. von, Morgenstern, O. Theory of Games and Economic Behavior. Moscow, Nauka publ., 1970, 708 p.
8. Andreichikov, A. V., Andreichikova, O. N. System analysis and synthesis of strategic decisions in innovation: Basics of strategic innovation management and marketing [*Sistemnyj analiz i sintez strategicheskikh reshenij v innovatike: Osnovy strategicheskogo innovacionnogo menedzhmenta i marketinga*]. Moscow, Librokom publ., 2011, 248 p.
9. Andreichikov, A. V., Andreichikova, O. N. System analysis and synthesis of strategic decisions in innovation: Conceptual design of innovative systems [*Sistemnyj analiz i sintez strategicheskikh reshenij v innovatike: Konceptual'noe proektirovanie innovacionnykh system*]. Moscow, Librokom publ., 2013, 432 p.
10. Andreichikov, A. V., Andreichikova, O. N. Strategic management in innovation organizations. System analysis and decision making [*Strategicheskij menedzhment v innovacionnykh organizacijah. Sistemnyj analiz i prinjatie reshenij*]. Moscow, Infra-M publ., 2013, 396 p.
11. Andreychikov, A. V., Markov, D. S., Astashkina, L. A. Intelligent System for Strategic Decisions. *World of Transport and Transportation*, Vol. 12, 2014, Iss. 5, pp. 130–145. ●

Information about the authors:

Andreychikov, Alexander V. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, Andreichikov@mail.ru.

Andreychikova, Olga N. – D.Sc. (Eng.), professor, leading researcher of Central economical and mathematical institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Alexandrol@mail.ru.

Tabunov, Evgeny V. – Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, +7 (495) 684–29–06.

Article received 08.06.2015, accepted 16.10.2015.

