

Р. А. Мунасыпов, Г. И. Таназлы

ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Статья посвящена вопросам концептуального анализа схемотехнических вариантов зарядных устройств. Зарядные устройства используются для питания емкостных накопителей энергии. Особое внимание уделено исследованию проблем, связанных с формализацией процедуры. *Зарядные устройства; емкостные накопители энергии; концептуальный анализ*

При решении задачи создания зарядных устройств для емкостных накопителей энергии (ЗУ ЕНЭ) возникает ряд проблем, связанных с формализацией процедуры схемотехнического проектирования данных устройств:

- высокая размерность задачи проектирования, обусловленная существованием большого числа допустимых проектных альтернатив;
- неопределенности условий, в которых осуществляется процедура проектирования;
- использование принципов композиционного проектирования.

Проблема высокой размерности задачи проектирования относится ко всей совокупности проектных альтернатив: множеству целей, достижение которых решает задачу проектирования; множеству путей и средств достижения целей, которые касаются разнообразных схемотехнических вариантов построения силовой части ЗУ ЕНЭ и их схем управления; совокупности технических, экономических и прочих ограничений, влияющих на выбор способов достижения целей, и совокупности наличных или потребных ресурсов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Неопределенные факторы, связанные с разработкой таких устройств, имеют преимущественно целевой характер. Их существование обусловлено отдаленностью во времени этапа непосредственного применения разрабатываемых устройств и неоднозначностью будущих условий их применения. В свою очередь, условия применения ЗУ ЕНЭ связаны с недостаточной изученностью многообразных явлений, сопровождающих процесс их функционирования и взаимодействие с различными типами нагрузок.

Суть проблемы, связанной с использованием принципов композиционного проектирования состоит в том, что процедура создания сложных многофункциональных комплексов разбивается на ряд этапов, каждый из которых характеризуется определенным уровнем детализации оборудования. Вначале процедура проектирования делится на две составляющие: научно-исследовательские работы (НИР) и опытно-конструкторскую разработку (ОКР). В свою очередь, в составе НИР выделяются следующие этапы:

- поисковые НИР;
- целевые НИР (фундаментальные и прикладные исследования);
- внешнее проектирование;
- формирование требований к изделию.

Аналогично ОКР разбивается на следующие этапы:

- внутреннее проектирование;
- разработка рабочего проекта и конструкторской документации;
- изготовление, испытания и доводка опытного образца;
- решение о серийном производстве.

Задачи, решаемые на каждом из перечисленных этапов, должны быть достаточно строго согласованы с глобальной целью, для достижения которой создается изделие. Основой согласования задач и целей каждого этапа проектирования с общей целью являются исследования эффективности решений, направленных на достижение этой глобальной цели. Этап НИР является начальным этапом проектирования. На этом этапе осуществляется проблемный анализ в форме поисковых НИР (при поиске возможных путей решения проблемы) и целевых НИР, в рамках которых могут быть организованы фундаментальные и прикладные исследования,

направленные на обоснование рационального выбора средств достижения цели проектирования. На основе результатов прикладных исследований должны быть сформированы требования к системе и разработке технического задания. Этот этап называют внешним проектированием системы (или схемотехническим проектированием).

В процессе внешнего проектирования формируется основная концепция создания изделия, проводится анализ внешней обстановки для проведения исследований эффективности изделия в выявленных условиях, а также вырабатываются требования к изделию и разрабатывается техническое задание (ТЗ) на основе оценки эффективности изделия по обобщенным критериям эффективности. Процесс внешнего проектирования имеет четыре стадии: определение цели проектирования; определение объекта проектирования; синтез математической модели объекта проектирования; формализация задачи проектирования.

На первой стадии анализируют прогнозируемые изменения внешней среды и оценивают рассогласования характеристик действующих изделий относительно их требуемых значений, соответствующих допустимому уровню эффективности этих изделий. Решение о разработке нового изделия принимают при существенном снижении эффективности изделия в прогнозируемых условиях обстановки. После всестороннего обоснования и принятия решения о разработке перспективной системы формируют цели разработки и проводят их структуризацию. Цели разработки тесно увязывают с той целью, для достижения которой создается изделие. Конкретное проектирование элементов, агрегатов и подсистем называют внутренним проектированием.

Основными стадиями внутреннего проектирования являются: предварительное, эскизное и рабочее проектирование. На стадии предварительного проектирования формируется облик изделия, разрабатываются технические решения по комплектующим изделиям, формулируются технические предложения. В процессе эскизного проектирования вырабатывается конструктивно-компоновочная схема, формируется облик основных агрегатов и устройств, входящих в изделие. Изготовление и доводка опытного образца также относятся к внутреннему проектированию, которое заканчивается принятием решения о серийном производстве изделия (или его элементов). На каждом последующем этапе проектирования осуществляется углубленная

детализация разрабатываемого изделия, формируется новая совокупность возможных проектных решений, в результате чего по мере разработки изделия число возможных способов его реализации существенно возрастает. Вместе с тем, исчерпывающая оценка свойств разрабатываемого оборудования оказывается возможной лишь после окончания проектирования, поскольку полная область определения оценочных функций, устанавливающих степень соответствия проектируемого изделия требованиям технического задания, формируется на завершающем этапе его разработки. Для снижения трудоемкости процедуры проектирования происходит исключение неудовлетворительных решений, выявленных в ходе проектирования. Однако при этом необходимо оценивать возможные варианты на промежуточных этапах проектирования. Такая оценка производится с помощью локальных показателей, которые формируются на основе исходной совокупности оценочных функций и которые определены на множестве вариантов, свойственных данному этапу проектирования. Множество локальных показателей выбирается с учетом предпочтений лица, принимающего решение, сформировавшихся в ходе предыдущих разработок. Использование субъективных оценок является характерной особенностью внешнего и начальных этапов внутреннего проектирования. При этом субъективные оценки рассматриваются как индивидуальный способ обработки тех аспектов неформализуемых данных, которые доступны индивидуальному суждению.

С учетом субъективных факторов устанавливается также степень соответствия исследуемого варианта исходным требованиям к комплексу, выдвигаются предположения о мере правдоподобия возможных результатов функционирования изделия при учете различных случайных факторов. Поскольку индивидуальный опыт, интуиция, эрудиция и квалификация у разных людей различны, то и сформированные на этой основе субъективные оценки имеют значительный разброс. Неоднозначность суждений, основанных на субъективном анализе, обуславливает многие трудности, которые возникают при выборе оптимального облика ЗУ ЕНЭ.

Перечисленные проблемы оказывают взаимное влияние друг на друга, в результате чего возникают специфические комбинированные проблемы. Так, в процессе композиционного проектирования, разрабатываемый комплекс разбивается на ряд функционально обособлен-

ных подсистем. При этом искусственно разорванные связи между подсистемами выступают в качестве неопределенных факторов вплоть до завершения разработки подсистем и определения их характеристик.

Еще один аспект процедуры проектирования связан с невозможностью рассчитать поведение комплекса во всех условиях применения и для всех режимов работы. В связи с этим при проектировании учитывается лишь то множество вариантов условий применения и режимов работы, при которых комплекс в целом способен с определенной эффективностью выполнить задачу. Остальные варианты образуют множество нерасчетных условий функционирования, для которых параметры внешней среды и характеристики комплекса являются неопределенными. Указанные обстоятельства увеличивают степень неопределенности условий, в которых создаются новые схемы ЗУ ЕНЭ. С другой стороны, достоверность выбора оптимального варианта, осуществляемого в условиях неопределенности, зависит от объема объективной информации относительно свойств разрабатываемого устройства.

Для уменьшения риска выбора неудовлетворительного варианта процедуре оценки должен предшествовать этап анализа свойств проектируемого комплекса. Причем объем проводимых исследований должен обеспечивать снижение неопределенности в оценке его свойств до уровня, позволяющего осуществить обоснованный отбор. Таким образом, совокупность анализируемых проектных альтернатив расширяется за счет экспериментов, которые могут быть осуществлены для увеличения объема достоверной информации о проектируемом комплексе, а также за счет возможных результатов подобных экспериментов, что увеличивает и без того высокую размерность задачи проектирования.

Для решения сформулированных проблем разработаны следующие принципы формирования облика сложных технических систем с использованием экспертной системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности.

Под методами экспертного оценивания понимают [1] совокупность логических и математических процедур, направленных на получение от специалистов-экспертов информации, ее анализ и обобщение с целью выбора рациональных решений. Основной целью подобных процедур является получение достоверной информации из имеющихся субъективных оценок. При этом

суждения экспертов обрабатываются с использованием соответствующего математического аппарата, в результате чего получают так называемые экспертные оценки.

Выбор метода получения экспертной информации во многом определяется целью и задачами экспертного оценивания. Поскольку при экспертизе специалисты выносят суждения о предпочтительности того или иного множества показателей эффективности, упорядочивают их по важности, высказывают субъективные оценки вероятности случайных факторов, то в качестве основных методов экспертного оценивания используются методы ранжирования, балльных и точечных оценок, попарного сравнения, сортировки и их модификации.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА РАНЖИРОВОК

При решении задачи ранжирования эксперт должен расположить оцениваемые элементы в порядке возрастания (прямое ранжирование) или убывания (обратное ранжирование) их предпочтительности и приписать каждому из них ранги в виде натуральных чисел. При прямом ранжировании наиболее предпочтительный элемент имеет ранг 1, а наименее предпочтительный – ранг m . При невозможности осуществить строгое ранжирование допускается присваивать таким элементам одинаковые ранги. В этом случае используются так называемые стандартизированные ранги, равные среднему арифметическому номеров группы элементов в ранжированном ряду, которые оказались одинаковыми по предпочтительности. Пусть, например, i -я группа одинаковых по предпочтительности элементов, в состав которой входит l_i элементов, располагается в ранжированном ряду следом за элементом с номером n_i . Тогда стандартизированный ранг элементов этой группы равен величине

$$r_i^{\text{ст}} = n_i + 0,5(l_i + 1). \quad (1)$$

Обработка и анализ ранжировок проводится с целью построения группового отношения предпочтения на основе индивидуальных предпочтений экспертов. При этом ставятся следующие задачи:

I. Определение тесноты связи между ранжировками двух экспертов на элементах множества предъявления.

II. Определение взаимосвязи между двумя элементами по индивидуальным мнениям членов группы относительно характеристик этих элементов.

III. Оценка согласованности мнений экспертов в группе, содержащей более двух экспертов.

В задачах (I)–(II) в качестве меры тесноты связи используется коэффициент ранговой корреляции. В зависимости от того, допускается ли только строгое или нестрогое ранжирование, используется, соответственно, коэффициент ранговой корреляции Кендалла или Спирмена.

Коэффициент ранговой корреляции Кендалла для задачи (I) имеет вид

$$\tau = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i < j} \text{sign}(r_{1j} - r_{1i}) \text{sign}(r_{2j} - r_{2i}), \quad (2)$$

где r_{ki} – ранг, приписанный k -м экспертом ($k = 1, 2$) i -му элементу ($i = 1, 2, \dots, m$).

Для задачи (II) величины, фигурирующие в формуле (2) имеют следующий смысл: m – число характеристик двух оцениваемых элементов; r_{ki} – ранг i -й характеристики в ранжировке k -го элемента, выставленный группой экспертов.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена при нестрогом ранжировании вычисляется следующим образом

$$\rho = \frac{S_0 + S_1 + S_2}{\sqrt{(1 - S_1)(1 - S_2)}}, \quad (3)$$

где

$$S_0 = 1 - \frac{6}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (r_{1i} - r_{2i})^2,$$

$$S_1 = \frac{3}{m(m^2-1)} \sum_{i=1}^p l_i(l_i-1),$$

$$S_2 = \frac{3}{m(m^2-1)} \sum_{i=1}^q l_i(l_i-1),$$

здесь p, q – число различных групп нестрогих рангов в первой и второй ранжировках, соответственно. Коэффициенты корреляции (2), (3) меняются случайным образом в пределах от -1 до $+1$, причем $+1$ означает, что ранжировки одинаковы, -1 противоположны. Равенство коэффициентов корреляции нулю означает, что ранжировки независимы. Доказано [2], что коэффициент ранговой корреляции Кендалла (2) имеет распределение, хорошо согласующееся с распределением Стьюдента. В связи с этим для проверки статистической гипотезы об уровне значимости полученных коэффициентов можно использовать известные критерии согласия.

Если индивидуальные предпочтения экспертов хорошо согласуются, то можно переходить к решению задачи (III). Для оценки согласован-

ности мнений в группе применяются специальные величины: коэффициент конкордации Кендалла C_k и энтропийный коэффициент согласия C_E . Коэффициент конкордации имеет различный вид в зависимости от типа ранжирования.

При строгом ранжировании

$$C_k = \frac{12 \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n (r_{ij} - 0,5n(m+1)))^2}{n^2 m (m^2 - 1)}; \quad (4)$$

для нестрогих рангов

$$C_k = \frac{12 \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n (r_{ij} - 0,5n(m+1)))^2}{n^2 m (m^2 - 1) - n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{p(i)} (l_k^3 - l_k)}; \quad (5)$$

где $p(i)$ – число групп одинаковых рангов в ранжировке i -го эксперта.

В свою очередь энтропийный коэффициент согласия имеет вид

$$C_E = 1 + \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{q=1}^{Q(j)} p_{qj} \lg p_{qj}}{m \lg m}; \quad (6)$$

здесь p_{qj} – оценка вероятности q -го ранга, присвоенного j -му элементу, которая определяется как отношение числа экспертов, присвоивших элементу j ранг q , к общему числу экспертов; $Q(j)$ – общее число различных рангов, присвоенных экспертами j -му элементу.

Если в результате анализа выявлено, что коэффициенты C_k и C_E малы (близки к нулю), то согласованность мнений экспертов неудовлетворительная.

При достаточной согласованности мнений экспертов (коэффициенты C_k и C_E близки к единице), можно сформировать групповое мнение о предпочтениях. Его выражают либо с помощью средних рангов, набранных каждым элементом

$$r_j = \sum_{i=1}^n r_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (7)$$

либо с помощью упорядоченных взвешенных рангов с учетом компетентности экспертов

$$r_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i r_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА БАЛЛЬНЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ОЦЕНОК

Часто для выражения предпочтения используются оценки, выраженные в баллах. Обработка и анализ балльных оценок как количественных показателей возможна лишь в том случае, если шкала балльных оценок непрерывна или имеет большое число градаций (широко исполь-

зуются шкалы в 100 баллов), а также, если выработаны общепризнанные правила начисления баллов. После формирования балльных оценок (b_{ij} – балл, присвоенный j -му элементу i -м экспертом) дальнейшая обработка и анализ проводятся статистическими методами оценивания в предположении, что разница в ответах экспертов обусловлена лишь случайными погрешностями. При этом каждому элементу $j = 1, 2, \dots, m$ ставится в соответствие средний балл, определяемый как среднее арифметическое балльных оценок по рассматриваемому элементу

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_{ij}. \quad (9)$$

Степень согласованности экспертов в этом случае оценивается дисперсиями индивидуальных балльных оценок

$$b_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_{ij} - b_j)^2, \quad (10)$$

или коэффициентами вариации $v_j = \delta_j / b_j$.

При анализе согласованности мнений экспертов обычно считают, что она удовлетворительная, если $v_j \leq 0,3$, и хорошая, если все $v_j \leq 0,2$.

В ряде важных случаев экспертного оценивания необходимо получить непосредственную характеристику исследуемого объекта точечную оценку, например, вероятность достижения заявленных показателей функционирования при выбранном схемном варианте преобразователя, оценку ожидаемых значений схмотехнических параметров ЗУ ЕНЭ и т.д. В результате обработки таких оценок могут быть получены показатели среднего результата X^* , дисперсии δ_x^2 и вариации v_x

$$X^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad b_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X^*)^2, \quad (11)$$

$$v_x = \frac{b_x}{X^*},$$

где X_i – точечная оценка изучаемой характеристики, данная i -м экспертом.

Статистическая оценка полученных результатов позволяет определить не только доверительный интервал оцениваемых значений характеристики, но и противоречивость мнения конкретного эксперта. При решении первой задачи используется выражение для доверительной вероятности

$$P \left\{ X^* - X^c \mid \langle \varepsilon \rangle = \delta \right\}, \quad (12)$$

где X^c – неизвестное истинное значение характеристики, $\delta = 0,9-0,95$, ε – искомая величина доверительного интервала.

При большой численности экспертов в группе $n \geq 25-30$ распределение оценки X^* в (12) полагают нормальным, иначе – распределением Стьюдента с $(n-1)$ степенью свободы.

Наиболее удаленные от X^* точечные оценки x_i проверяют на противоречивость, для чего вычисляют вероятность

$$P(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} S(t, n-1) dt,$$

где $\alpha = (X_i - X^*) / \delta_x$, $S(t, n-1)$ – плотность распределения Стьюдента. Оценка X_i i -го эксперта считается противоречивой при $P(\alpha) < 0,05 - 0,1$.

В ряде случаев более удобной формой выражения суждений экспертов являются не точечные, а интервальные оценки. При этом эксперт указывает X_i^{MIN} – минимальное и X_i^{MAX} – максимальное значения, между которыми, по его мнению, находится истинное значение характеристики. Тогда точечная оценка i -го эксперта вычисляется следующим образом:

$$x_i = 0,5(x_i^{\text{min}} + x_i^{\text{max}}).$$

Если существует возможность указать также наиболее вероятную оценку X_i^{MED} , то хорошая аппроксимация точечной оценки получается при использовании β -распределения

$$x_i = 0,25(x_i^{\text{min}} + 2x_i^{\text{med}} + x_i^{\text{max}}).$$

Групповые оценки по-прежнему вычисляются по формулам (11).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВАЖНОСТИ

Опишем несколько достаточно простых методов определения коэффициентов относительной важности.

1. Метод непосредственной численной оценки.

При использовании этого метода каждому i -му эксперту предлагается указать коэффициент важности θ_{ij} j -го элемента, удовлетворяющий условию нормировки

$$\sum_{j=1}^m \theta_{ij} = 1, \quad \theta_{ij} \geq 0.$$

За групповые оценки в этом случае принимают средние значения

$$\theta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{ij}. \quad (13)$$

2. Метод балльного оценивания.

В заданной бальной шкале каждый эксперт должен оценить представленные элементы. За групповые оценки принимают числа

$$\theta_j = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij}}; \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (14)$$

где b_{ij} – балл, присвоенный j -му элементу i -м экспертом.

3. Метод попарных сравнений.

Наиболее просто эксперт может выразить свое предпочтение при сравнении двух элементов. Задача обработки и анализа подобных попарных сравнений заключается в получении групповых суждений относительно всех элементов предъявленной совокупности. Решение этой задачи предлагается осуществлять в следующей последовательности.

В результате попарного сравнения каждый эксперт проводит оценку всех из $0,5m(m-1)$ пар элементов (kl), $k, l = 1, 2, \dots, m$, по следующему правилу

$$\begin{aligned} e_{kl}^i &= 1, \text{ если } k \text{ предпочтительнее } l; \\ e_{kl}^i &= 0,5, \text{ если } k \text{ эквивалентен } l; \\ e_{kl}^i &= 0, \text{ если } l \text{ предпочтительнее } k; \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Полученные оценки усредняются, в том числе с учетом уровня компетентности экспертов

$$e_{kl}^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i e_{kl}^i; \quad (15)$$

числа e_{kl}^* являются элементами матрицы E^* ; причем $e_{kl}^* + e_{lk}^* = 1$. На основе матрицы E^* строится групповая ранжировка элементов предъявленной совокупности, определяются весовые коэффициенты (коэффициенты важности) элементов и оценивается согласованность мнений экспертов. При этом оценка согласованности мнений экспертов и противоречивости суждений отдельного эксперта является первоочередной задачей, так как она определяет целесообразность выполнения остальных операций.

Оценка согласованности мнений экспертов проводится с использованием коэффициентов вариации, вычисляемых по (11) с подстановкой вместо X_i величины e_{kl}^i и вместо $X^* - e_{kl}^*$. Противоречивость суждений отдельных экспертов оценивается с использованием (12).

После выполнения указанных этапов коэффициенты важности θ_j , $j = 1, 2, \dots, m$; находятся как собственные числа матрицы E^* . Для этого решается уравнение вида

$$\det [E^* - \theta I] = 0. \quad (16)$$

Простейшим алгоритмом решения этого уравнения является следующий алгоритм, реализующий метод простой итерации.

Шаг 1: Задать критерий остановки, либо требуемое количество итераций $p_{\text{тр}}$ (практика показывает, что $p_{\text{тр}} = 3 \div 5$).

Шаг 2: Полагаем $p = 0$; $\theta_j = 1/m, j = 1, 2, \dots, m$.

Шаг 3: Задаем $p = p + 1$.

Шаг 4: Вычисляем

$$\theta_j^{(p)} = \frac{\sum_{k=1}^m e_{kj}^* \theta_k^{(p-1)}}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m e_{kl}^* \theta_k^{(p-1)}}.$$

Шаг 5: Проверяем условие $p \geq p_{\text{тр}}$. Если оно выполняется – закончить вычисления, в противном случае – идти к шагу 3.

Результирующая ранжировка определяется по полученной совокупности коэффициентов важности $\theta_1 \geq \theta_2 \geq \dots \geq \theta_m$.

После получения информации от экспертов проводится ее анализ и обработка с целью выявления согласованности мнений отдельных экспертов и формирования коллективного мнения. Эта задача решается с помощью специальных процедур, позволяющих учитывать компетентность экспертов – метода Дельфи, методов ранговой корреляции Спирмена и Кендалла, процедур формирования группового мнения.

Одним из наиболее распространенных методов выявления и измерения предпочтений экспертов, сочетающем процедуры получения информации с эффективной обратной связью, позволяющей экспертам корректировать свои суждения, является метод Дельфи. Это метод групповой экспертной оценки, основанной на выявлении согласованного коллективного мнения при индивидуальном анкетном опросе экспертов в несколько туров (экспертизы по методу Дельфи чаще всего проводят в четыре тура). В каждом последующем туре предусматривается сообщение экспертам результатов предыдущего тура; в некоторых случаях экспертам предлагается обосновать свое мнение с учетом представленных ему оценок. Метод Дельфи можно использовать только в том случае, если мнение эксперта может быть выражено в числовой форме и имеется достаточная информационная база для вынесения суждения экспертом в виде числовой оценки.

В первом туре после того, как экспертам разъяснена цель экспертизы и сообщены вопросы (персонально в виде анкеты, пояснительной записки), эксперты представляют свои ответы без аргументации. Вся экспертная информация

поступает в группу управления. При ее обработке выделяют средние и крайние мнения – медиану, верхнюю и нижнюю квартили (значения оцениваемой характеристики, выше и ниже которых расположены 25 % численных значений оценок). Расстояние между квартилями в этом случае характеризует близость мнений экспертов. Экспертам сообщают эти сведения и проводят второй тур опроса. Иногда экспертам сообщают только квартили (считается, что это позволяет ослабить давление группового мнения на экспертов).

При втором туре опроса тех экспертов, чьи оценки оказались в крайних квартилях, просят представить обоснованные аргументы в пользу своих суждений. Подобные аргументы представляются анонимно и с ними знакомят остальных экспертов. Это позволяет всем экспертам учесть те обстоятельства, которые они по какой-либо причине пропустили или которыми пренебрегли. В результате этого эксперты могут пересмотреть свои суждения или подправить свои оценки. Скорректированная информация вновь поступает в группу управления экспертизы, реализуя обратную связь.

После обработки результатов второго тура скорректированные групповые (медиана) и оригинальные мнения (крайние квартили), а также всю аргументацию с сохранением анонимности сообщают экспертам и проводят очередной тур опроса.

В результате многотуровой процедуры опроса могут наблюдаться две ситуации: во-первых, от тура к туру растет согласованность мнений экспертов; во-вторых, размежевание мнений с высокой согласованностью внутри подгрупп. Последнее может объясняться либо наличием представителей различных научных направлений, либо неодинаковой интерпретацией исходной информации специалистами различных профилей. В любом из этих случаев руководитель группы управления принимает решение о проведении дальнейшего опроса с целью подтверждения создавшегося положения или об окончании проведения экспертизы и составлении отчета по ней.

Таким образом, к основным особенностям метода Дельфи относятся: анонимность; полный отказ от личных контактов и коллективных обсуждений; обоснование ответов оригинальных экспертов по запросу группы управления; обратная связь, реализуемая в ходе много турового опроса. При формировании группового мнения в каждом туре могут быть определены и в дальнейшем учитываться оценки коэффици-

ентов компетентности экспертов. Это тем более важно, что предварительное определение коэффициентов компетентности по профессиональным показателям методом взаимной самооценки, результатам контрольных экспертиз и другими априорными методами не всегда надежно.

Основным недостатком метода Дельфи является то, что в процессе много турового опроса, иногда достаточно разнесенного по времени, может сложиться лишь видимость высокой согласованности индивидуальных мнений вследствие стремления экспертов быстрее отделаться от вопросов. Это приводит к поверхностному индивидуальному анализу проблемы и стремлению к «групповому» мнению. При реализации метода Дельфи комплексно используются процедуры выявления и измерения предпочтений. Существуют специальные комплексные методы, предназначенные для анализа сложных систем и процессов: планирование средств для фундаментальных исследований, управление научными и опытно-конструкторскими разработками, разработка сценариев развития при прогнозировании и др. К таким методам относятся: метод решающих матриц, метод прогнозного графа, метод взаимовлияний, методика ПАТТЕРН, КВЕСТ и др.

Для формализации экспертных оценок используются специальные оценочные функции, которые должны удовлетворять следующим условиям:

- число оценочных функций должно быть минимально возможным;
- множество оценочных функций должно быть исчерпывающим, т. е. оно должно давать полное представление о степени достижения цели, в том числе оно должно обеспечивать ранжирование вариантов по предпочтению и ставить им в соответствие количественную меру эффективности;
- каждая оценочная функция должна быть измеримой и должна давать возможность для восстановления зависимости (параметризации) от значений проектных и тактических параметров или от значений оценочных функций, определенных для вариантов с более высоким уровнем детализации;
- все оценочные функции для данной совокупности вариантов должны обладать одинаковой шкалой измерения, причем из всех возможных шкал целесообразно выбирать наиболее сильную.

Специфика задачи оценки по сформированному множеству показателей состоит в том, что ее решение будет заведомо субъективным. Это объясняется не столько отмеченной выше субъективностью выбора множества оценочных функций, сколько тем обстоятельством, что некоторые из объектов проектирования могут оказаться более предпочтительными по одним показателям и менее предпочтительными по другим. В этом случае главное внимание уделяется выработке решающего правила, основанного на компромиссе между значениями различных оценочных функций. Поскольку основная аксиома оценки по нескольким показателям утверждает невозможность строгого математического доказательства, в общем случае, существования максимально предпочтительного объекта, то любой объект из числа недоминируемых (т. е. не являющихся менее предпочтительными по всем показателям сразу) может быть признан наиболее предпочтительным конкретным экспертом в конкретных условиях. Таким образом, сложность проблемы выбора по совокупности показателей связана не с трудностями их вычисления, а с концептуальной обоснованностью выбора наилучшего решения.

Для того, чтобы полученные оценки были максимально обоснованными, выработка решающего правила должна осуществляться в строгом соответствии с объемом достоверной информации о свойствах используемых оценочных функций. Наиболее простая информация заключается в определении независимости отдельных оценочных функций по предпочтению. Если оценка эффективности по каждому частному показателю не изменяется от того, какие значения принимают другие показатели, то такие показатели называются взаимонезависимыми по предпочтению. Информация о взаимонезависимости оценочных функций позволяет построить решающее правило на основе аксиомы В. Парето. С помощью этого правила осуществляется предварительная сортировка объектов по безусловным классам оптимальности, в результате которой формируются подмножества недоминируемых по Парето объектов. Однако это правило не является достаточно конструктивным, поскольку каждое такое подмножество содержит, как правило, большое число возможных вариантов.

Следующий этап в выработке решающего правила состоит в использовании информации об относительной важности отдельных оценочных функций. Информация подобного рода может быть качественной или количественной.

Особую практическую значимость имеют следующие частные случаи качественной информации об относительной важности: случай одинаковой важности всех оценочных функций; случай абсолютного превосходства в важности отдельных оценочных функций; случай невозможности компенсации уменьшения значений определенной группы равноценных показателей за счет сколь угодно большого увеличения значений других показателей этой группы.

Основанием для вывода об абсолютном превосходстве одних показателей над другими (включая ситуацию о невозможности скомпенсировать уменьшение одних показателей увеличением других) служит такая степень различия отдельных показателей по важности, что эксперт вначале сравнивает оценки только по самому важному показателю, не обращая внимания на остальные, потом только по второму и т. д. Информация об абсолютном превосходстве определенных показателей позволяет проранжировать возможные варианты с использованием процедуры лексикографической оценки. Реализация этой процедуры предусматривает декомпозицию исходной многомерной задачи оценки в определенную последовательность задач оценки по иерархически упорядоченным скалярным показателям (предполагается, что первый показатель важнее второго, второй – третьего и т. д.).

$$\begin{aligned}
 \Omega_1^* &: \max \varepsilon_1(\omega), \text{ по всем } \omega \text{ принадлежащим } \Omega; \\
 \Omega_2^* &: \max \varepsilon_2(\omega), \text{ по всем } \omega \text{ принадлежащим } \Omega_1^*; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Omega_k^* &: \max \varepsilon_k(\omega), \text{ по всем } \omega \text{ принадлежащим } \\
 &\Omega_{k-1}^*.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Здесь Ω – исходное множество оцениваемых объектов; совокупность подмножеств $\Omega_k^*, \Omega_{k-1}^*, \dots, \Omega_1^*$ включает объекты равнозначные в смысле эффективности с точки зрения соответствующего показателя. Процедура (17) продолжается до тех пор, пока не будут перебраны все показатели, либо пока для некоторого k мощность множества Ω_k^* не окажется равной единице. После этого процедура (17) повторяется для элементов множества $\Omega^{(1)} = \Omega / \Omega_1^*$ и так далее до тех пор, пока не будет получено разбиение исходного множества $\Omega = \Omega_1^* \cup \Omega_1^{(1)*} \cup \dots \cup \Omega_1^{(k)*}$.

Описанный алгоритм позволяет не только проранжировать множество объектов по классам эффективности, но и сформировать условные оценки эффективности для этих объектов

$$W_i = \alpha/r_i + \beta, \tag{18}$$

здесь r_i – стандартизированный ранг i -го объекта; $\beta = \min W$ – нижняя грань оценки; $\alpha = (\max W - \min W)$ – диапазон изменения значений оценки.

Если среди множества оценочных функций отсутствуют показатели с абсолютным превосходством над остальными критериями, то существует возможность преобразования этого множества в скалярную целевую функцию. Подобное решающее правило является наиболее сильным, поэтому использовать его можно только в том случае, когда существует достаточная экспертная информация о допустимой степени компенсации уменьшения значений одних показателей увеличением других. Задачи такого типа встречаются часто и связаны с использованием однородных показателей. При этом в качестве функции агрегирования может быть принята аддитивная функция

$$W_a = \sum_{k=1}^p v_k \varepsilon_k, \quad (19)$$

или мультипликативная функция вида

$$W_M = \prod_{k=1}^p \varepsilon_k^{r(k)}. \quad (20)$$

Последний способ свертки оценочных функций предполагает, что допустимой является не абсолютная, а относительная компенсация изменения значений одних показателей другими.

ВЫВОДЫ

На результатах оценки сказывается влияние большого числа факторов, последствия которых нельзя заранее предусмотреть из-за их случайного характера или из-за отсутствия достаточной о них информации. Под ситуацией риска обычно понимают наличие случайных величин, которые характеризуются соответствующими законами распределения вероятности. В качестве случайных параметров могут выступать особенности конкретных видов технологических процессов, для реализации которых используется ЗУ, а также отдельные характеристики вхо-

дящих в него устройств. Законы распределения случайных параметров определяются на основе анализа соответствующих аналогов, расчетным путем, а также в результате обработки данных натуральных испытаний. В свою очередь, ситуация неопределенности характеризуется отсутствием объективной информации о значениях параметров или об их законах распределения. Для формализации неопределенных факторов широко используются экспертные оценки субъективных законов распределения значений неопределенных величин. Однако, как отмечалось выше, субъективные оценки имеют значительный разброс, что усложняет процедуру формирования группового экспертного решения. Для повышения согласованности экспертных оценок и устранения их внутренней противоречивости предлагается специальный алгоритм поддержки принятия решений в условиях недостаточной априорной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т. 3: Эффективность технических систем / Под ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 378 с.
2. **Кофман А.** Введение в теорию нечетких множеств / Под ред. М. Травкина. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

ОБ АВТОРАХ

Мунасыпов Рустем Анварович, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инженер по электронике (УАИ). Д-р техн. наук по системному анализу и управлению (УГАТУ). Иссл. в обл. робототехники.

Таназлы Георгий Иванович, доц. каф. автомат. проектирования информ. систем. Дипл. магистр по информатике и вычислительн. технике (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по матем. моделированию, числ. методам и комплексам программ (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. матем. моделирования.