

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Ю. Б. Нечаев*, Г. А. Кащенко**

* Воронежский государственный университет

** ОАО «Концерн «Созвездие»

Поступила в редакцию 20.11.2012 г.

Аннотация. Рассмотрена методика формирования и многокритериального выбора вариантов инфотелекоммуникационных систем (ИТКС) с учетом неопределенности исходных данных.

Ключевые слова: инфотелекоммуникационные системы, многокритериальный выбор, формирование вариантов.

Annotation. The technique of formation and multicriterion choice of variants of infotelecommunication systems (ITCS) is offered, allowing to consider incompleteness of initial data.

Key words: infotelecommunication systems, multicriterion choice, formation of variants

В последние годы современные ИТКС создаются на основе применения значительного числа уже готовых аппаратно-программных средств различного назначения (приемо-передатчики, антенны, маршрутизаторы, средства криптографической защиты информации, мультиплексоры и т. д.). В настоящее время существует большая номенклатура указанного оборудования различных фирм-производителей, реализующего одни и те же функции, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к конкретной системе. Насыщение рынка зарубежной и отечественной элементной базой, большое разнообразие условий, в которых работают ИТКС, специфичность требований, предъявляемым к ним, вопросы надежности и долговечности, наличие большого числа конструктивных типов усложняют выбор наилучшего варианта этих систем для конкретных условий эксплуатации. Кроме того, на практике такой выбор очень часто усложняется из-за невозможности получить достоверную информацию о характеристиках отдельных компонент, например, либо из-за нежелания производителей оценивать свою продукцию по предлагаемым показателям качества, либо из-за сокрытия или умышленного искажения реальных показателей с целью введения в заблуждение конкурентов. В этом случае задачу форми-

рования и многокритериального выбора (МКВ) варианта ИТКС приходится решать в условиях неопределенности и неполноты исходных данных. Целью статьи является разработка методики решения задач формирования и выбора наилучшего варианта сложной ИТКС из набора альтернативных взаимозаменяемых, но различных по своим характеристикам компонентов, выпускаемых различными фирмами производителями.

С позиций системного подхода задачу формирования и выбора наилучшего варианта ИТКС можно представить следующей математической моделью:

$$\langle T, X, N, Q, C, P \rangle, \quad (1)$$

где T — тип постановки задачи (например, t_1 — сгенерировать варианты и выбрать наилучший вариант системы; t_2 — сгенерировать и выбрать вариант, наиболее близкий по свойствам к заданному техническому заданию или прототипу (лидеру рынка); t_3 — сгенерировать варианты и упорядочить весь набор вариантов по степени сходства к заданному объекту и др.); X — множество альтернатив; N — модель неопределенного фактора; Q — векторный критерий; C — множество векторных оценок; P — модель предпочтения.

Типовой процесс проектирования ИТКС включает три основных этапа: формирование множества возможных альтернативных вари-

антов; оценку множества сформированных вариантов и усечение его за счет удаления худших вариантов; принятие решения о выборе из множества нехудших вариантов (множества Парето) наилучшего варианта.

При решении задачи формирования альтернативных вариантов ИТКС, когда задана ее декомпозиция на подсистемы (компоненты), очень часто целесообразно использовать морфологическую модель, широко используемую при проектировании сложных технических систем [1, 2]. Пусть выполнена функциональная декомпозиция ИТКС на некоторое конечное множество подсистем (компонентов)

$$\{A_j, j = 1, 2, \dots, L, \bigcup_{j=1}^L A_j = A\}.$$

В предположении, что, например, для системы широкополосного беспроводного доступа существует некоторое множество альтернативных способов реализации каждой подсистемы A_{lk} , $k = 1, 2, \dots, K$, $l = 1, 2, \dots, L$, может быть задана морфологическая таблица (см. табл. 1).

Общее число всевозможных альтернативных вариантов ИТКС определяется по формуле:

$$K = \prod_{l=1}^L K_l. \quad (2)$$

В выражении (2) приняты следующие обозначения: K_l – число способов (альтернатив) для реализации l -й функции или обобщенной подсистемы; L – число всех функций. Генерируемый вариант системы (подсистемы) представляет выборку альтернатив по одной из каждой строки морфологической таблицы и в общем виде записывается следующим образом:

$$A_i = \{A_{1i}, A_{2j}, \dots, A_{Ln}\}, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, K_1$; $j = 1, 2, \dots, K_2, \dots, n = 1, 2, \dots, K_L$.

При формировании на основе морфологического подхода множества допустимых вариантов ИТКС A_D должны учитываться ограничения на структуру, параметры и техническую реализацию компонентов и системы в целом. Если среди сгенерированного множества альтернатив имеются несовместимые варианты, то они удаляются из таблицы.

Для оценки эффективности альтернативных вариантов ИТКС должны быть формализованы показатели качества и конкурентоспособности (ПКК), наиболее полно характеризующие систему с точки зрения лица, принимающего решения (ЛПР) (заказчика). Выбранная номенклатура ПКК для оценки эффективности однотипных ИТКС должна быть одинаковой. Необходимо отметить, что с увеличением количества принятых для оценки ПКК трудоемкость работ возрастает, а объективность оценки при превышении некоторого порога практически не повышается, поэтому в состав оценочных показателей целесообразно включать только те показатели, которые наиболее значимы для оценки эффективности конкретной ИТКС. Вместе с тем, если ПКК окажется недостаточно, то при увеличении числа этих показателей интегральная оценка может измениться. Выбранные ПКК целесообразно иерархически структурировать, что позволяет сравнивать системы по отдельным групповым признакам и облегчить процедуру определения коэффициентов весомости показателей. Группировка ПКК по признакам способствует получению более достоверных результатов интегральной оценки объекта. В общем случае все множество ПКК включает несколько десятков критериев, сгруппированных по видовым группам: конструктивные, функциональные, эксплуатационные, экономические и специальные.

В комплекс алгоритмов много-критериального выбора (МКВ) входят следующие алгорит-

Таблица 1

Морфологическая таблица

Морфологические классы	Возможные способы реализаций подсистем	Число способов реализации
1. Базовая станция	$[A_{11}], A_{12}, \dots, A_{1K_1}$	K_1
2. Абонентская станция	$A_{21}, [A_{22}], \dots, A_{2K_2}$	K_2
3. Антенная система	$A_{31}, A_{32}, \dots, [A_{3K_3}]$	K_3
4. Оборудование для организации связи между базовыми станциями	$[A_{41}], A_{42}, \dots, A_{4K_4}$	K_4

мы: на основе метода анализа иерархий (МАИ) [3] для решения задачи типа t_1 ; на основе теории нечетких множеств (НМ) для решения задачи большой размерности типа t_1 ; на основе модифицированного метода упорядочения предпочтений через сходство с идеальным решением (ММУП) для решения задачи типа t_2 [4,5]; на основе оценок необходимого и возможного уровней соответствия (ОНВУС) вариантов заданным требованиям для решения задачи t_3 [6,7].

В классическом варианте МАИ используется грубая оценка наибольшего собственного вектора матрицы – среднее геометрическое по строкам, а для оценки наибольшего собственного значения – функция следа матрицы [3]. Вследствие этого возникают погрешности вычисления собственных значений и собственных векторов, что может привести к неверному выбору наилучшего решения. Для уменьшения влияния ошибок из-за приближенных оценок в реализованном варианте МАИ применяется прямое вычисление собственных векторов и собственных значений матрицы парных сравнений (МПС) как обратно-симметричной матрицы. С этой целью она приводится к верхней почти треугольной форме Хессенберга. Для этого используется метод Хаусхолдера приведения матрицы к верхней почти треугольной форме. Затем методом QR-итераций со сдвигом вычисляются собственные значения и собственные векторы. Проверка устойчивости решения путем изменения элементов МПС показала, что при применении рассмотренного способа ошибка в оценках экспертов на один ранг практически не значима.

Алгоритм решения задачи МКВ вариантов ИТКС на основе теории НМ включает следующие основные шаги:

Шаг 1. Представление критериев как нечётких множеств, заданных на универсальных множествах вариантов с помощью функций принадлежности.

Шаг 2. Определение функций принадлежности нечётких множеств на основе экспертной информации о парных сравнениях вариантов с помощью 9-бальной шкалы Т. Саати [3].

Шаг 3. Ранжирование вариантов на основе пересечения нечётких множеств-критериев, которые отвечают известной в теории принятия решений схеме Беллмана–Заде [8].

Шаг 4. Ранжирование критериев методом парных сравнений и учёт полученных рангов

как степеней концентраций соответствующих функций принадлежности

Для решения задачи t_2 , где имеется множество целевых функций, которые не могут быть оптимизированы одновременно из-за присущей им несоразмерности и конфликта между целями, применяется ММУП [4, 5]. Этот метод обеспечивает реализацию принципа компромисса, при котором выбранная альтернатива имеет наикратчайшее расстояние до позитивного идеального решения (PIS) (например, лидеру рынка) и наибольшее расстояние до негативного идеального решения (NIS) (аутсайдеру рынка).

Для реализации ММУП использован следующий алгоритм [4]:

Шаг 1. Задаётся относительная важность w_i каждой из k целевых функций.

Шаг 2. Определяются PIS (q) и NIS (q), решая задачи: $q^* = \{q_1^*, q_2^*, \dots, q_k^*\}$, $q^- = \{q_1^-, q_2^-, \dots, q_k^-\}$, где $q_j^* = \max_{x \in X} q_j(x)$ для $\forall j \in J$ и $q_i^* = \min_{x \in X} q_i(x)$ для $\forall i \in I$; $q_j^- = \min_{x \in X} q_j(x)$ для $\forall j \in J$ и $q_i^- = \max_{x \in X} q_i(x)$ для $\forall i \in I$; $q_j(x)$, $j \in J$ – цель для максимизации типа «выгода», $q_i(x)$, $i \in I$ – цель для минимизации типа «стоимость»; $k \in K$, $K = I \cup J$.

Шаг 3. Решается задача: $\min d^{PIS}(x)$, $\max d^{NIS}(x)$, $x \in X$, где

$$d^{PIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_j \left[\frac{q_j^* - q_j(x)}{q_j^* - q_j^-} \right]^2 + \sum_{i \in I} w_i \left[\frac{q_i(x) - q_i^*}{q_i^- - q_i^*} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

$$d^{NIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_j \left[\frac{q_j(x) - q_j^-}{q_j^* - q_j^-} \right]^2 + \sum_{i \in I} w_i \left[\frac{q_i^- - q_i(x)}{q_i^- - q_i^*} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

$w_t, t = 1, 2, \dots, k$ – относительная важность целей; d^{PIS} и d^{NIS} – расстояния до наилучшего идеального решения и наихудшего идеального решения соответственно.

Шаг 4. Найти $(d^{PIS})^*$, $(d^{NIS})^*$, $(d^{PIS})'$, $(d^{NIS})'$, решая задачу: $(d^{PIS})^* = \min_{x \in X} d^{PIS}(x)$ и решение

$$x^{PIS}, (d^{NIS})^* = \max_{x \in X} d^{NIS}(x) \text{ и решение } x^{NIS}, (d^{PIS})' = d^{PIS} x^{NIS}, (d^{NIS})' = d^{NIS} x^{PIS}.$$

Шаг 5. Найти функции принадлежности $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } d^{PIS}(x) < (d^{PIS})^* \\ \frac{(d^{PIS})' - d^{PIS}(x)}{(d^{PIS})' - (d^{PIS})^*}, & \text{если } (d^{PIS})^* \leq d^{PIS}(x) \leq (d^{PIS})' \\ 0, & \text{если } d^{PIS}(x) > (d^{PIS})' \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } d^{NIS}(x) > (d^{NIS})^* \\ \frac{d^{NIS}(x) - (d^{NIS})'}{(d^{NIS})^* - (d^{NIS})'}, & \text{если } (d^{NIS})' \leq d^{NIS}(x) \leq (d^{NIS})^* \\ 0, & \text{если } d^{NIS}(x) < (d^{NIS})' \end{cases}$$

Шаг 6. Найти: $\max \alpha, \mu_1(x) \geq \alpha, \mu_2(x) \geq \alpha, x \in X$. Здесь $\alpha = \min[\mu_1(x), \mu_2(x)]$ или $\mu_1(x) \geq \alpha$ и $\mu_2(x) \geq \alpha$. α – степень удовлетворения уровней для обеих целей.

Шаг 7. Если решение удовлетворяет ЛПР, то останов. Однако ЛПР может пожелать изменить относительную важность целевых функций и/или функции принадлежности, тогда возвратиться к шагам 1 или 5.

В процессе выбора варианта ИТКС могут возникнуть ситуации, когда в одних системах имеется избыточность отдельных или нескольких ПКК, а в других системах наоборот – некоторые требования реализованы недостаточно, что может привести в обоих случаях к нерациональному выбору варианта системы. В этом случае выбор целесообразно осуществлять на основе метода ОНВУС вариантов заданным требованиям.

Алгоритм данного метода включает следующие основные шаги [6, 7]:

Шаг 1. Задание множества требований T_j и оценок i -го варианта по j -му критерию O_{ij} .

Шаг 2. Определение уровня различия оценок T_j и O_{ij} : $C_{ij} = T_j - O_{ij}$. Если $T_j > O_{ij}$, т.е. оценка j -го критерия превосходит оценку i -го варианта по данному критерию, то $C_{ij} > 0$. Если $T_j < O_{ij}$, то $C_{ij} < 0$. В случае когда $T_j = O_{ij}$, значение уровня различия оценок равно нулю.

Шаг 3. Определение уровня идентичности i -го варианта j -му критерию I_{ij} : $I_{ij} = O_{ij} / T_j$. При $T_j = O_{ij}$ значение $I_{ij} = 1$ единице, т.е. оценка i -го варианта по j -му критерию идентична требованию по этому критерию. Когда $T_j > O_{ij}$ i -й вариант имеет недостаточный уровень соответствия по j -му критерию. При $T_j < O_{ij}$ i -й вариант превосходит над требованием по j -му критерию.

Шаг 4. Определение уровня возможного соответствия i -го варианта j -му критерию S_{ij} : $S_{ij} = \min[I_{ij}, 1]$. Если $O_{ij} > T_j$, то уровень возможного соответствия i -го варианта j -му критерию принимается равным 1, так как в такой ИТКС j -й критерий полностью реализован. В противном случае $S_{ij} = I_{ij}$.

Шаг 5. Задание уровня необходимого соответствия i -го варианта j -му критерию F_{ij} : $F_{ij} = \min[S_{ij}, I_{ij}] / 2$.

Шаг 6. Определение субъективной уверенности в том, что i -й вариант соответствует j -му критерию не хуже, чем это задается требованиями T_j : $\eta_{ij} = (S_{ij} + F_{ij}) / 2$.

Шаг 7. Усреднение каждого показателя по всему множеству критериев:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{ij} &= \sum_{j=1}^M C_{ij} / M, \quad \bar{I}_{ij} = \sum_{j=1}^M I_{ij} / M, \\ \bar{S}_{ij} &= \sum_{j=1}^M S_{ij} / M, \quad \bar{F}_{ij} = \sum_{j=1}^M F_{ij} / M, \\ \bar{\eta}_{ij} &= \sum_{j=1}^M \eta_{ij} / M. \end{aligned}$$

Шаг 8. Выбор наилучшего варианта, у которой результирующий уровень различия оценок C_{ij} минимальный, а результирующий уровень идентичности, результирующий уровень возможного соответствия, результирующий уровень необходимого соответствия и результирующая субъективная уверенность максимальные.

Предлагаемая методика формирования и выбора варианта ИТКС основана на идее комбинирования морфологического метода и рассмотренных методов решения задач МКВ. Причем, если в традиционном подходе формирование морфологического множества происходит на первом этапе, то в рассматриваемом случае вначале осуществляется ранжирование и усечение множества вариантов отдельных компонент системы, а затем уже происходит формирование морфологического множества значительно меньшей размерности. Обобщенная структурная схема методики приведена на рис. 1.

Для простоты рассмотрим пример решения задачи МКВ варианта ИТКС на основе теории нечетких множеств (НМ). Пусть имеется три альтернативных варианта ИТКС s_1, s_2, s_3 . Для сравнительной оценки ИТКС воспользуемся такими критериями: q_1 – перспективность технологии; q_2 – мобильность; q_3 – защищенность; q_4 – надежность. Экспертные сравнения систем s_1, s_2, s_3 по критериям $q_1 - q_4$: по критерию



Рис. 1. Структурная схема методики формирования и выбора варианта ИТКС

q_1 – более чем явное преимущество s_3 над s_1 и существенное преимущество s_3 над s_2 ; по критерию q_2 – слабое преимущество s_3 над s_1 и менее чем слабое преимущество s_3 над s_2 ; по критерию q_3 – менее чем существенное преимущество s_3 над s_1 и s_3 над s_2 ; по критерию q_4 – существенное преимущество s_3 над s_1 и более чем слабое преимущество s_3 над s_2 .

Этим экспертным высказываниям соответствуют следующие МПС:

$$M(q_1) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 8/5 & 1/8 \\ 5/8 & 1 & 1/5 \\ 8 & 5 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$M(q_2) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & \begin{bmatrix} 1 & 3/2 & 1/3 \end{bmatrix} \\ s_2 & \begin{bmatrix} 2/3 & 1 & 1/2 \end{bmatrix} \\ s_3 & \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$M(q_3) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & \begin{bmatrix} 1 & 4/5 & 1/5 \end{bmatrix} \\ s_2 & \begin{bmatrix} 5/4 & 1 & 1/4 \end{bmatrix} \\ s_3 & \begin{bmatrix} 5 & 4 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$M(q_4) = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 \\ s_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/4 \end{bmatrix} \\ s_2 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/4 \end{bmatrix} \\ s_3 & \begin{bmatrix} 4 & 4 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

Критерии $q_1 - q_4$ можно представить нечеткими множествами $\tilde{q}_i, i = 1, 2, 3, 4$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_1 &= \{0.4/s_1; 0.47/s_2; 0.89/s_3\}, \\ \tilde{q}_2 &= \{0.79/s_1; 0.81/s_2; 0.91/s_3\}, \\ \tilde{q}_3 &= \{0.91/s_1; 0.91/s_2; 0.98/s_3\}, \\ \tilde{q}_4 &= \{0.48/s_1; 0.49/s_2; 0.85/s_3\}. \end{aligned}$$

Веса критериев, определенные экспертным путем, принимают следующие значения: $W_1 = 0.04$; $W_2 = 0.19$; $W_3 = 0.33$; $W_4 = 0.22$; $W_5 = 0.11$; $W_6 = 0.11$.

После выполнения операции пересечения нечетких множеств $\tilde{q}_1 - \tilde{q}_4$ окончательно получим

$$\tilde{D}_1 = \{0.4/s_1; 0.47/s_2; 0.85/s_3\},$$

что свидетельствует о существенном преимуществе системы s_3 над системами s_1 и s_2 , а также о наличии слабого преимущества системы s_2 над системой s_1 .

Рассмотренная методика прошла апробацию при решении целого ряда задач формирования

и выбора вариантов ИТКС различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нечаев Ю. Б.* Формирование и выбор вариантов инфотелекоммуникационных систем на основе морфологического и иерархического подходов / Ю. Б. Нечаев, А. Г. Кащенко, Г. А. Кащенко, Р. В. Семенов, О. В. Николаев // Компьютерные науки и технологии: сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции. 3-5 октября 2011 г. Белгород. – Белгород: ООО «ГиК», 2011. – С. 288–293.

2. *Одрин В. М.* Морфологический анализ систем / В. М. Одрин, В. В. Картавов // Киев: Наукова думка, 1977. – 183 с.

3. *Саати Т.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети; пер. с англ. / науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.

4. *Царев Р. Ю.* Модификация метода упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением для задач многоцелевого принятия решений / Р. Ю. Царев // Информационные технологии, № 7, 2007. – С. 19–23.

5. *Tapia C. G., Murtahg B. A.* Interactive fuzzy programming with preference criteria in multiobjective decision-making // Computers Ops. Res. 1991. Vol 18. N. 3. – P. 307–316.

6. *Кащенко А. Г.* Альтернативный выбор варианта средств защиты информации в распределенных сетях беспроводного доступа / А. Г. Кащенко, Г. А. Кащенко, Р. В. Семенов // Радиолокация, навигация, связь: XVII между. НТК. Воронеж: ВГУ, 2011. Т. 2. – С. 812–816.

7. *Кащенко А. Г.* Нечеткие модели на основе проекции нечетких множеств в задачах оценки и управления рисками информационной безопасности / А. Г. Кащенко, В. Г. Чернов, А. Н. Солнцев // Информация и безопасность: регион. науч.-техн. журнал. Воронеж: ВГТУ. 2006. Вып. 2. – С. 113–121.

8. *Беллман Р.* Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. – С. 172–215.

Нечаев Ю. Б. – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных систем ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-724. E-mail: nechaev_ub@mail.ru

Кащенко Г. А. – ОАО «Концерн «Созвездие» Воронеж, Россия

Nechaev Yu. B. – doctor of Physics-math. Sciences, Professor of the dept. of the Information Systems, Voronezh State University, Tel. (4732)208-724. E-mail: nechaev_ub@mail.ru

Kashenko G. A. – JSC «Sozvezdie» Concern», Voronezh, Russia