

К ВЫБОРУ ПРИОРИТЕТНЫХ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Предложен алгоритм построения аддитивного обобщенного качественно-количественного критерия, который использован для обоснования выбора наилучших вариантов модернизации ракетно-космических комплексов коммерческого назначения.

Запропоновано алгоритм побудови адитивного узагальненого якісно-кількісного критерію, який застосовується для обґрунтування вибору найкращих варіантів модернізації ракетно-космічних комплексів комерційного призначення.

The algorithm for formation of an additive general qualitative and quantitative criterion is proposed to validate selecting the best versions for improvement of commercial rocket- space complexes.

Выбор вариантов модернизации ракетных комплексов (РК) представляет собой сложную многомерную задачу. Ее решение связано с решением ряда составляющих задач, таких как анализ результатов маркетинга рынка пусковых услуг, проведение проектно-поисковых и проектно-расчетных работ по оценке ожидаемых потребительских характеристик множества вариантов, корпоративного обсуждения полученных результатов, анализ приоритетности вариантов с точки зрения вложения в их реализацию ресурсов и рисков и др.

Среди этих задач заметное место занимает задача выбора предпочтительных вариантов модернизации РК [1, 2]. При реальном проектировании ее решение связано с определением и учетом ряда критериев. Представляет интерес решение задачи выбора вариантов модернизации РК с использованием обобщенного критерия, в котором в качестве локальных критериев используются основные количественные и качественные характеристики РК.

Результаты решения этой задачи используются совместно с другими результатами при корпоративной подготовке проекта решения по базовым вариантам модернизации РК.

Известно, что решение многокритериальных задач в общем случае невозможно без привлечения дополнительной информации [3 – 5], например информации от руководителя проекта – лица, принимающего решения (ЛПР) – как ответственного за создание системы.

При наличии достаточной информации о количественных локальных критериях для решения задачи применяются методы многокритериальной теории полезности (МТП), изложенные, например, в [3, 5], а при качественных критериях – методы вербального анализа решения (ВАР) [4], в которых количественная информация заменяется качественной (интервальными оценками типа "отлично", "хорошо", "плохо"). Методы ВАР являются более надежными, хотя и менее точными. Однако их использование приводит к появлению несравнимых альтернатив, так как их разрешающая сила менее единицы [4]. Кроме этого, существуют задачи, например оценка конкурентоспособности [1, 6], которые требуют численного результата. Учитывая также, что, как правило, проекты характеризуются количественными и качественными характеристиками, представляется целесообразным развитие методов МТП в части их доработки для оценок не только количественных, но и качественных показателей. Следует отметить, что метод МТП, хотя и выдвигает повышенные требования к ЛПР, однако имеет разрешающую силу, равную единице, и является аксиоматически обоснованным.

© А.В. Дегтярев, А.Э. Кашанов, С.В. Сюткина, 2012

Ниже приведена методика определения обобщенного критерия, в состав которого входят количественные и качественные показатели, с учетом мнения ЛПР, которое базируется на результатах корпоративного обсуждения того или иного вопроса с соответствующими группами профессионалов.

Построение обобщенного показателя качества проекта при наличии количественных показателей основывается на алгоритме независимого шкалирования (АНШ) [3] многокритериальной теории полезности, который позволяет находить обобщенный критерий в виде

$$\varphi(u) = \sum_{i=1}^t r_i \cdot \omega_i(u_i),$$

где t – количество всех локальных критериев; $\omega_i(u_i)$ – функции ценности локальных критериев $u_i, i = \overline{1, t}$, $\omega_i(u_i) \in [0, 1]$ для всех $u_i \in U$; r_i – весовые коэффициенты, согласующие шкалы измерений разных критериев

$$\sum_{i=1}^t r_i = 1, \quad r_i > 0.$$

За счет определения весовых коэффициентов r_i функции ценности $\omega_i(u_i)$ строятся независимо друг от друга. Идея использования АНШ с учетом качественных критериев состоит в использовании функций ценностей количественных критериев для составления системы уравнений, что позволяет находить одновременно с весовыми коэффициентами r_i значения функций ценностей для всех градаций качественных критериев.

Процедура построения интегрального критерия состоит в следующем.

1. Обычным методом проводится проверка условия независимости по предпочтению для каждой пары критериев, включая качественные.

2. Для каждого критерия $i = \overline{1, t}$ ЛПР выделяет наименее и наиболее предпочтительные значения из области допустимых значений данного критерия.

Очевидно, для количественных критериев, удовлетворяющих принцип «чем больше, тем лучше», имеем: $u_i^0 = u_{i \min}$ – наименее предпочтительное значение, $u_i^1 = u_{i \max}$ – наиболее предпочтительное значение, а для количественных критериев, удовлетворяющих принцип «чем меньше, тем лучше»: $u_i^0 = u_{i \max}$ – наименее предпочтительное значение, $u_i^1 = u_{i \min}$ – наиболее предпочтительное значение.

Пусть также ЛПР определит наименее и наиболее предпочтительные градации качественных критериев

$$\begin{aligned} \omega_i(u_i^0) &= 0, \\ \omega_i(u_i^1) &= 1, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

где m – число качественных критериев.

3. Строятся функции ценности количественных критериев [5]. Для этого область значений каждой функции ценности разбивается на промежутки и, в результате диалога с ЛПР, находятся средние по предпочтению точки этих промежутков. Диалог с ЛПР продолжается до тех пор, пока не будет получено достаточное количество точек для построения определяемой функции

ценности. Для нахождения среднего значения каждого промежутка, ЛПР предлагаются две пары эквивалентных векторов, у которых разница между значениями второго выбранного критерия задается произвольно

$$(u_i^a, u_{il}) \sim (u_i^{cp}, u_{ix}),$$

$$(u_i^b, u_{ix}) \sim (u_i^{cp}, u_{il}),$$

где u_i^a – аргумент функции ценности, которая наименее предпочтительна на заданном промежутке; u_i^b – аргумент функции ценности, которая наиболее предпочтительна на заданном промежутке; u_{il} – более предпочтительное значение по второму выбранному критерию; u_{ix} – менее предпочтительное значение второго выбранного критерия. ЛПР должен указать одинаковое среднее значение u_i^{cp} в обоих парах эквивалентных векторов. Тогда значение функции ценности

$$\omega_i(u_i^{cp}) = \frac{\omega_i(u_i^a) + \omega_i(u_i^b)}{2}.$$

4. Задается первый вектор всех критериев $u^1 = ((u_1^*), u(\bar{1}))$, в котором произвольно, но не наименее предпочтительно значение первого количественно-го критерия $u_1^* \neq u_1^0$, а его дополнение $u(\bar{1})$ состоит из наименее предпочтительных значений всех остальных локальных критериев: $u_i = u_i^0, i = \overline{2, t}$.

Необходимо построить $(n-1)$ векторов, эквивалентных первому, где n – число количественных критериев. Для этого ЛПР в каждом векторе

$$u^p = (u_p^*, u(\bar{p})), p = \overline{2, n}$$

должен указать значение очередного количественного критерия u_p^* , дополнение которого $u(\bar{p})$ состоит из наименее предпочтительных значений всех остальных локальных критериев, которые входят в вектор $u_i = u_i^0, i \neq p, i = \overline{1, t}$.

Затем строим $(q-1)$ вектора, эквивалентные первому заданному вектору, где q – общее количество градаций всех качественных критериев, за исключением наименее предпочтительных

$$u^d = (u_f^*, u_j^d, u(\bar{f}, \bar{j})), d = \overline{2, q}.$$

В этих векторах критериям, входящим в дополнение $u(\bar{f}, \bar{j})$, присваиваются наихудшие значения, т.е. $u_i = u_i^0$ для всех $i \neq f, i \neq j, i = \overline{1, t}$. При этом эти векторы должны отличаться друг от друга градацией по одному качественному критерию $u_j^d, j = \overline{1, m}$, где m – число качественных критериев. ЛПР должен указать в этих векторах значение количественного критерия u_f^* .

5. В результате получим систему $k = n + q$ алгебраических уравнений, которая состоит из $(n + q - 1)$ уравнений эквивалентности векторов и уравнения нормирования

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^t r_i \cdot \omega_i(u_i^1) = \sum_{i=1}^t r_i \cdot \omega_i(u_i^j) & \text{для всех } u^j, j = \overline{2, k} \\ \sum_{i=1}^t r_i = 1 \end{cases},$$

где n – число количественных критериев; q – общее количество градаций всех качественных критериев, за исключением наименее предпочтительных.

Из системы уравнений необходимо найти все неизвестные для построения обобщенного качественно-количественного критерия

$$\varphi(u) = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \omega_i(u_i) + \sum_{j=1}^m r_j \cdot \omega_j(u_j) \begin{cases} \omega_j(u_j^0) = 0 \\ 0 < \omega_j(u_j) < 1 & \text{при } u_j \neq u_j^1, u_j \neq u_j^0, \\ \omega_j(u_j^1) = 1 \end{cases}$$

где m – число качественных критериев; u_j^0, u_j^1 – соответственно наименее и наиболее предпочтительные градации качественных критериев.

6. Альтернатива считается наилучшей с наибольшим значением аддитивного обобщенного качественно-количественного критерия.

Рассмотрим пример построения обобщенного критерия, который может быть использован при предварительном выборе схемы построения и выборе основных характеристик модернизируемого РК на этапе проведения проектно-поисковых работ. Характеристики модернизируемого РК определены двумя количественными и пятью качественными локальными критериями, среди которых три бинарных. Для оценки вариантов модернизации РК, которые определены как количественными, так и качественными локальными критериями, необходимо использовать предложенную методику построения обобщенного качественно-количественного критерия.

Определим области количественных и качественных локальных критериев модернизируемого РК следующим образом:

$u_1 \in U_1 = [\text{да}, \text{нет}]$ – модульный принцип построения ракеты-носителя (РН);

$u_2 \in U_2 = [\text{да}, \text{нет}]$ – способность выведения группы космических аппаратов (КА) одним пуском;

$u_3 \in U_3 = [\text{да}, \text{нет}]$ – способность выведения группы КА на разные орбиты одним пуском;

$u_4 \in U_4 = [0,9; 0,95]$ – надежность РН;

$u_5 \in U_5 = [70\%; 98\%]$ – степень автоматизации подготовки и проведения пуска;

$u_6 \in U_6 = [\text{значительно ниже мирового уровня}, \text{незначительно ниже мирового уровня}, \text{соответствуют мировому уровню}, \text{превышают мировой уровень}]$ – габариты отсека полезной нагрузки;

$u_7 \in U_7 = [\text{малая}, \text{умеренная}, \text{значительная}, \text{высокая}]$ – степень достижения цели.

В рассматриваемом случае каждая пара критериев (u_i, u_j) , где $i \neq j; i, j = \overline{1,7}$ не зависит по предпочтению от своего дополнения $U(\bar{i}, \bar{j})$. Пара критериев (u_i, u_j) не зависит по предпочтению от остальных критериев $U(\bar{i}, \bar{j}) = (u_1, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_{j-1}, u_{j+1}, \dots, u_7)$, если отношение предпочтительности, установленное между векторами $U' = [u'_i, u'_j, u(\bar{i}, \bar{j})] \sim U'' = [u''_i, u''_j, u(\bar{i}, \bar{j})]$, не зависит от фиксированных значений критериев $U(\bar{i}, \bar{j})$, т.е.

$$[u'_i, u'_j, u(\bar{i}, \bar{j})] \sim [u''_i, u''_j, u(\bar{i}, \bar{j})] \Leftrightarrow [u'_i, u'_j, u(\bar{i}, \bar{j})] \sim [u''_i, u''_j, u(\bar{i}, \bar{j})].$$

Это позволяет построить нормированный аддитивный критерий, который согласовывает между собой единицы измерения предпочтительности по отдельным критериям за счет выбора весовых коэффициентов $r_i, i = \overline{1,7}$.

Для каждого критерия $i = \overline{1,7}$ ЛПР выделяет наименее и наиболее предпочтительные значения из области допустимых значений данного критерия. Поскольку надежность РН и степень автоматизации пуска необходимо максимизировать, определяем, что $u_4^0 = 0,9$ – наименее предпочтительная надежность РН, $u_4^1 = 0,95$ – наиболее предпочтительная надежность РН, $u_5^0 = 70\%$ – наименее предпочтительная степень автоматизации пуска, $u_5^1 = 98\%$ – наиболее предпочтительная степень автоматизации пуска. Соответственно: $u_1^0 = \text{нет}$ – наименее предпочтительно отсутствие модульного принципа РН, $u_1^1 = \text{да}$ – наиболее предпочтительно наличие модульного принципа РН, $u_2^0 = \text{нет}$ – наименее предпочтительно отсутствие способности выведения группы КА одним пуском, $u_2^1 = \text{да}$ – наиболее предпочтительно наличие способности выведения группы КА одним пуском, $u_3^0 = \text{нет}$ – наименее предпочтительно отсутствие способности выведения группы КА на разные орбиты одним пуском, $u_3^1 = \text{да}$ – наиболее предпочтительно наличие способности выведения группы КА на разные орбиты одним пуском, $u_6^0 = \text{значительно ниже мирового уровня}$ – наименее предпочтительные габариты отсека полезной нагрузки, $u_6^1 = \text{превышают мировой уровень}$ – наиболее предпочтительные габариты отсека полезной нагрузки, $u_7^0 = \text{малая}$ – наименее предпочтительная степень достижения цели проектом, $u_7^1 = \text{высокая}$ – наиболее предпочтительная степень достижения цели проектом.

Полагаем, что

$$\begin{aligned} \omega_1(u_1^0) &= \omega_1(\text{нет}) = 0, \quad \omega_1(u_1^1) = \omega_1(\text{да}) = 1, \\ \omega_2(u_2^0) &= \omega_2(\text{нет}) = 0, \quad \omega_2(u_2^1) = \omega_2(\text{да}) = 1, \\ \omega_3(u_3^0) &= \omega_3(\text{нет}) = 0, \quad \omega_3(u_3^1) = \omega_3(\text{да}) = 1, \\ \omega_4(u_4^0) &= \omega_4(0,9) = 0, \quad \omega_4(u_4^1) = \omega_4(0,95) = 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_5(u_5^0) &= \omega_5(70\%) = 0, \quad \omega_5(u_5^1) = \omega_5(98\%) = 1, \\ \omega_6(u_6^0) &= \omega_6(\text{значительно ниже мирового уровня}) = 0, \\ \omega_6(u_6^1) &= \omega_6(\text{превышают мировой уровень}) = 1, \\ \omega_7(u_7^0) &= \omega_7(\text{малая}) = 0, \quad \omega_7(u_7^1) = \omega_7(\text{высокая}) = 1.\end{aligned}$$

Функции ценностей критериев $\omega_i(u_i)$, $i = \overline{1,7}$ строятся независимо друг от друга.

Построим функции ценностей для количественных критериев: надежности РН и степени автоматизации пуска. Для этого области значений этих функций $[0,1]$ разбиваются на промежутки и, в результате диалога с ЛПР, находятся средние по предпочтению точки этих промежутков до тех пор, пока не будет получено достаточное число точек для построения данных функций. Для нахождения среднего значения каждого промежутка ЛПР предлагаются две пары эквивалентных векторов, у которых разница между значениями второго выбранного критерия задается произвольно

$$\begin{aligned}b &= (u_i^a, u_j^{\text{луч}}) \sim a = (u_i^{\text{cp}}, u_j^{\text{хуж}}), \\ c &= (u_i^b, u_j^{\text{хуж}}) \sim d = (u_i^{\text{cp}}, u_j^{\text{луч}}),\end{aligned}$$

где u_i^a – аргумент функции ценности, которая наименее предпочтительна на заданном промежутке; u_i^b – аргумент функции ценности, которая наиболее предпочтительна на заданном промежутке; u_i^{cp} – аргумент функции ценности со средним значением на заданном промежутке; $u_j^{\text{луч}}$ – более предпочтительное значение второго выбранного критерия; $u_j^{\text{хуж}}$ – менее предпочтительное значение второго выбранного критерия.

Отыскание экспертом точки половинного деления u_i^{cp} равнозначно нахождению двух пар эквивалентных векторов $b \sim a$, $c \sim d$, при которых уменьшение критерия u_i^{cp} до u_i^a и уменьшение критерия u_i^b до u_i^{cp} компенсируется увеличением значения второго критерия u_j на одну и ту же величину $\Delta u_j = u_j^{\text{луч}} - u_j^{\text{хуж}}$.

Построим функции ценности локальных критериев надежности РН и степени автоматизации пуска согласно опросу ЛПР. Ниже, в качестве примера, показаны результаты первых двух опросов ЛПР для нахождения двух точек на графике функции ценности критерия надежности РН, см. рис. 1.

Первый диалог с ЛПР:

$$\begin{aligned}b &= (u_4^0, u_5^{\text{луч}}) \sim a = (u_4^{0,5}, u_5^{\text{хуж}}), \\ c &= (u_4^1, u_5^{\text{хуж}}) \sim d = (u_4^{0,5}, u_5^{\text{луч}}), \\ b &= (0,9; 85\%) \sim a = (u_4^{0,5}; 78\%), \\ c &= (0,95; 78\%) \sim d = (u_4^{0,5}; 85\%),\end{aligned}$$

$$u_4^{0,5} = 0,92.$$

Второй диалог с ЛПР:

$$b = (u_4^0, u_5^{\text{луч}}) \sim a = (u_4^{0,25}, u_5^{\text{хуж}}),$$

$$c = (u_4^{0,5}, u_5^{\text{хуж}}) \sim d = (u_4^{0,25}, u_5^{\text{луч}}),$$

$$b = (0,9; 85\%) \sim a = (u_4^{0,25}; 78\%),$$

$$c = (0,92; 78\%) \sim d = (u_4^{0,25}; 85\%),$$

$$u_4^{0,25} = 0,91.$$

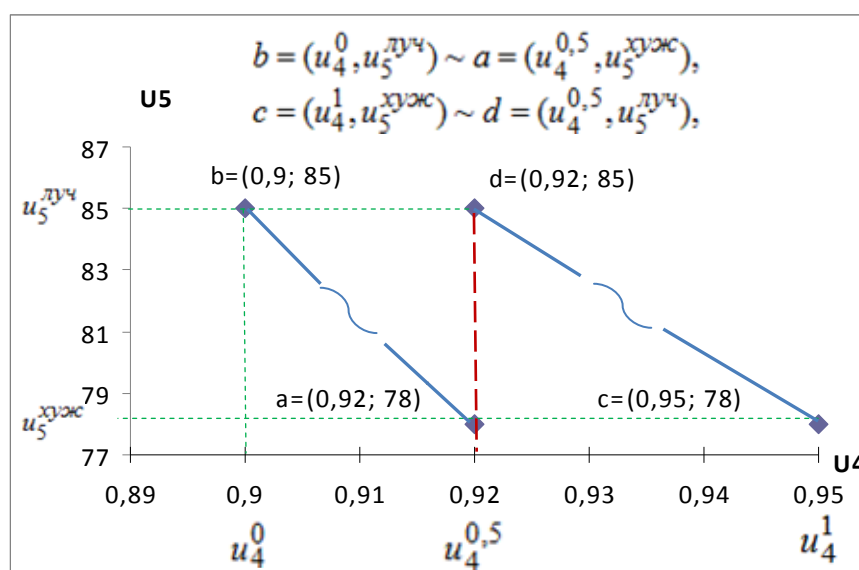


Рис. 1

На рис.1 в графическом виде показан первый опрос ЛПР, где указана точка критерия надежности РН $u_4 = 0,92$ со значением функции ценности $\omega_4(u_4 = 0,92) = 0,5$.

Продолжаем опрашивать ЛПР до тех пор, пока не будет получено достаточное число точек для построения функций ценностей всех количественных критериев. Согласно полученным данным строим графики функций ценностей количественных критериев надежности РН (рис. 2) и степени автоматизации пуска (рис. 3).

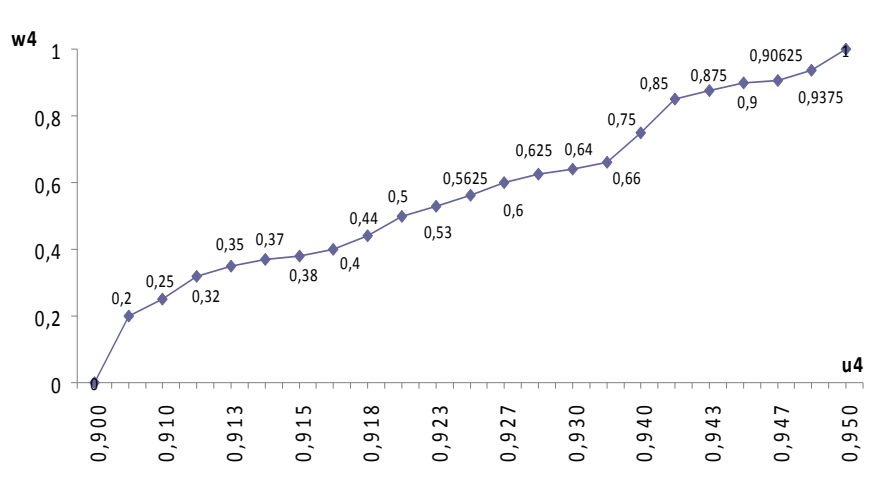


Рис. 2

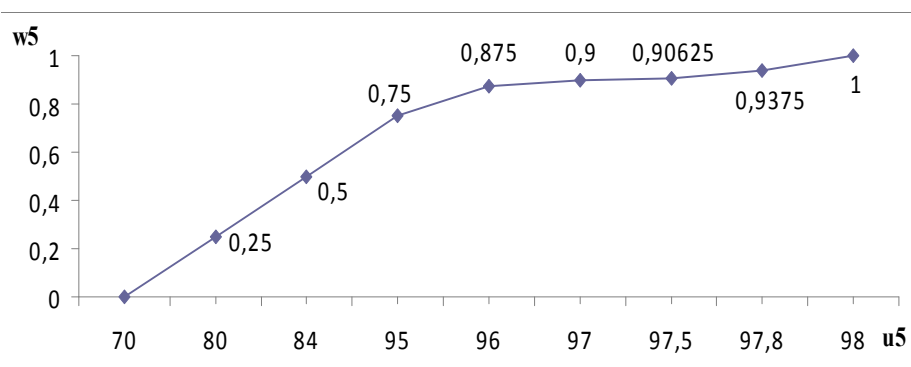


Рис. 3

Строятся эквивалентные векторы для нахождения весовых коэффициентов критериев $\tau_i, i = \overline{1,7}$ и неизвестных значений функций ценностей промежуточных градаций всех качественных критериев: ω_6 (соответствуют мировому уровню), ω_6 (незначительно ниже мирового уровня), ω_7 (умеренная), ω_7 (значительная). Задаём первый вектор

$$U^1(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{41}^* = 0,942, u_5^0 = 70\%, \\ u_6^0 = \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}).$$

Получены результаты опроса ЛПР согласно заданному первому вектору и условию эквивалентности всех векторов

$$(U^1 \sim U^2 \sim U^3 \sim U^4 \sim U^5 \sim U^6 \sim U^7 \sim U^8 \sim U^9 \sim U^{10} \sim U^{11}):$$

$$U^1(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{41}^* = 0,942, u_5^0 = 70\%, u_6^0 = \\ = \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$$

$U^2(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_4^0 = 0,9, u_{52}^* = 98\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^3(u_1^1 = \text{да}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{43}^* = 0,9, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^4(u_1^0 = \text{нет}, u_2^1 = \text{да}, u_3^0 = \text{нет}, u_{44}^* = 0,908, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^5(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^1 = \text{да}, u_{45}^* = 0,908, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^6(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{46}^* = 0,93, u_5^0 = 70\%, u_{66}^* =$
 $= \text{незначительно ниже мирового уровня}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^7(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{47}^* = 0,916, u_5^0 = 70\%, u_{67}^* =$
 $= \text{соответствуют мировому уровню}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^8(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{48}^* = 0,913, u_5^0 = 70\%, u_6^1 =$
 $= \text{превышают мировой уровень}, u_7^0 = \text{малая}),$

$U^9(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{49}^* = 0,927, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_{79}^* = \text{умеренная}),$

$U^{10}(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{410}^* = 0,918, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $= \text{значительно ниже мирового уровня}, u_{710}^* = \text{значительная}),$

$U^{11}(u_1^0 = \text{нет}, u_2^0 = \text{нет}, u_3^0 = \text{нет}, u_{411}^* = 0,913, u_5^0 = 70\%, u_6^0 =$
 $\text{значительно ниже мирового уровня}, u_7^1 = \text{высокая}),$

где ЛПР указал следующие значения локальных критериев:

$$u_{52}^* = 98\%; \quad u_{43}^* = 0,9; \quad u_{44}^* = 0,908; \quad u_{45}^* = 0,908; \quad u_{46}^* = 0,93;$$

$$u_{47}^* = 0,916; \quad u_{48}^* = 0,913; \quad u_{49}^* = 0,927; \quad u_{410}^* = 0,918; \quad u_{411}^* = 0,913.$$

Получаем систему уравнений аддитивных обобщенных критериев эквивалентных векторов и дополняем её уравнением нормирования весовых коэффициентов всех локальных критериев:

$$\begin{cases}
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_5 \cdot \omega_5(u_{52}^* = 98\%) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_1 \cdot \omega_1(u_1^1 = \text{да}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{43}^* = 0,9) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_2 \cdot \omega_2(u_2^1 = \text{да}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{44}^* = 0,908) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_3 \cdot \omega_3(u_3^1 = \text{да}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{45}^* = 0,908) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_6 \cdot \omega_6(u_{66}^* = \text{значительно ниже мирового уровня}) + \\
 + r_4 \cdot \omega_4(u_{46}^* = 0,93) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_6 \cdot \omega_6(u_{67}^* = \text{соответствуют мировому уровню}) + \\
 + r_4 \cdot \omega_4(u_{47}^* = 0,916) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_6 \cdot \omega_6(u_{68}^* = \text{превышают мировой уровень}) + \\
 + r_4 \cdot \omega_4(u_{48}^* = 0,913) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_7 \cdot \omega_7(u_{79}^* = \text{умеренная}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{49}^* = 0,927) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_7 \cdot \omega_7(u_{710}^* = \text{значительная}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{410}^* = 0,918) \\
 r_4 \cdot \omega_4(u_{41}^* = 0,942) = r_7 \cdot \omega_7(u_7^1 = \text{высокая}) + r_4 \cdot \omega_4(u_{411}^* = 0,913) \\
 r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7 = 1.
 \end{cases}$$

В результате решения системы получаем весовые коэффициенты всех критериев: $r_1 = 0,17$; $r_2 = 0,13$; $r_3 = 0,13$; $r_4 = 0,2$; $r_5 = 0,17$; $r_6 = 0,1$; $r_7 = 0,1$ и неизвестные значения функций ценностей промежуточных градаций всех качественных критериев: $\omega_6(u_{66}^*) = 0,42$; $\omega_6(u_{67}^*) = 0,9$; $\omega_7(u_{79}^*) = 0,5$; $\omega_7(u_{710}^*) = 0,82$.

Согласно полученным данным строим график функции ценности качественного критерия габарита отсека полезной нагрузки (рис. 4).

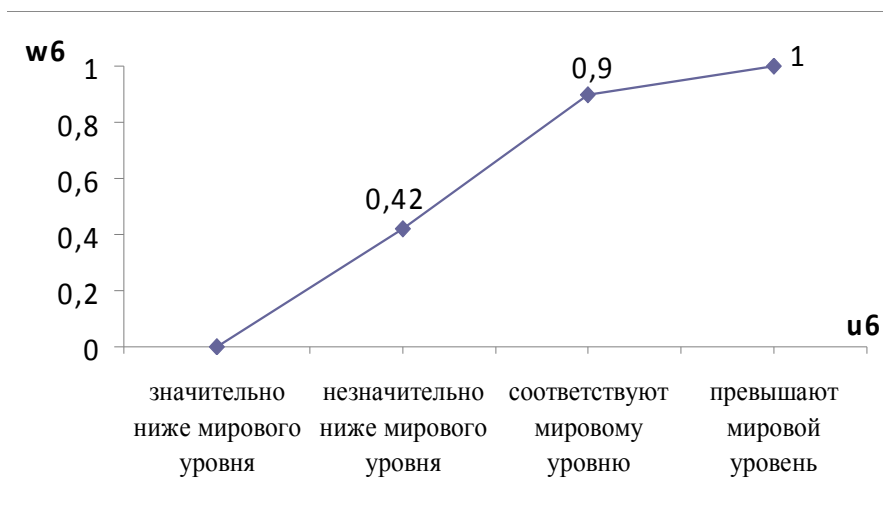


Рис. 4

Строим график функции ценности качественного критерия степени достижения цели проектом (рис. 5).

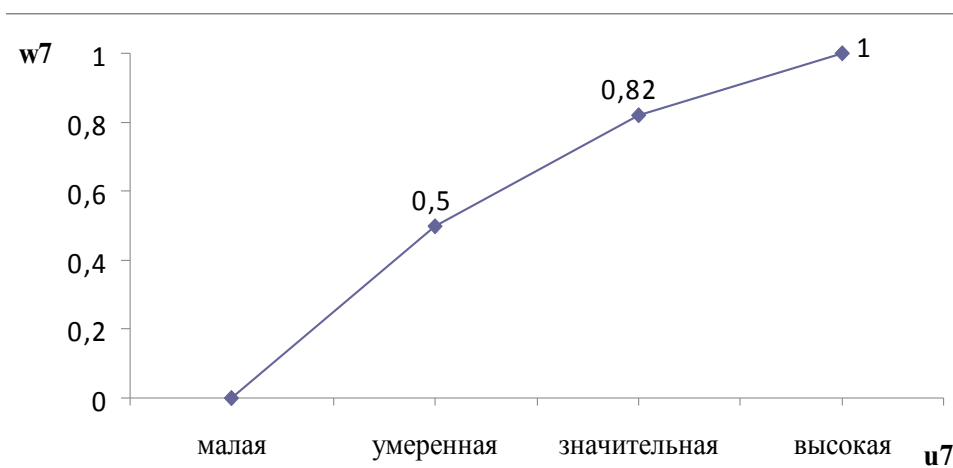


Рис. 5

В результате получаем нормированный аддитивный обобщенный критерий качества, который позволяет произвести оценку альтернатив по количественным и качественным локальным критериям.

Ниже, в табл. 1 для гипотетических вариантов РК приведены примеры оценки обобщенного критерия предпочтительности вариантов модернизации РК.

$$\varphi(u) = 0,17 \cdot \omega_1(u_1) + 0,13 \cdot \omega_2(u_2) + 0,13 \cdot \omega_3(u_3) + 0,2 \cdot \omega_4(u_4) + 0,17 \cdot \omega_5(u_5) + 0,1 \cdot \omega_6(u_6) + 0,1 \cdot \omega_7(u_7),$$

$$\text{где } \omega_1(u_1) = \begin{cases} \omega_1(\text{нет}) = 0 \\ \omega_1(\text{да}) = 1 \end{cases}, \quad \omega_2(u_2) = \begin{cases} \omega_2(\text{нет}) = 0 \\ \omega_2(\text{да}) = 1 \end{cases},$$

$$\omega_3(u_3) = \begin{cases} \omega_3(\text{нет}) = 0 \\ \omega_3(\text{да}) = 1 \end{cases},$$

$$\omega_6(u_6) = \begin{cases} \omega_6(\text{значительно ниже мирового уровня}) = 0 \\ \omega_6(\text{незначительно ниже мирового уровня}) = 0,42 \\ \omega_6(\text{соответствуют мировому уровню}) = 0,9 \\ \omega_6(\text{превышают мировой уровень}) = 1 \end{cases},$$

$$\omega_7(u_7) = \begin{cases} \omega_7(\text{малая}) = 0 \\ \omega_7(\text{умеренная}) = 0,5 \\ \omega_7(\text{значительная}) = 0,82 \\ \omega_7(\text{высокая}) = 1 \end{cases}.$$

Таблица 1. Значения обобщенного критерия предпочтительности для гипотетических вариантов модернизации РК

№ варианта	$u_i, \varphi(u)$							
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	$\varphi(u)$
1	нет	да	нет	0,943	80%	$\overline{k_2}$	l_3	0,4715
2	нет	да	да	0,910	84%	$\overline{k_4}$	l_2	0,545
3	да	да	да	0,940	97%	$\overline{k_3}$	l_3	0,905

В таблице 1: u_1 – модульный принцип РН; u_2 – способность выведения группы КА одним пуском; u_3 – способность выведения группы КА на разные орбиты одним пуском; u_4 – надежность РН [0,9, 0,95]; u_5 – степень автоматизации пуска [70%, 98%]; u_6 – габариты отсека полезной нагрузки: незначительно ниже мирового уровня ($\overline{k_2}$), соответствуют мировому уровню ($\overline{k_3}$), превышают мировой уровень ($\overline{k_4}$); u_7 – степень достижения цели: умеренная (l_2), значительная (l_3); $\varphi(u)$ – обобщенный количественно-качественный критерий приоритетности.

В частности, из табл. 1 следует, что второй вариант модернизации РК, обладающий способностью выведения группы КА на разные целевые орбиты при меньшей надежности пуска, умеренной степени достижения цели и некотором увеличении степени автоматизации подготовки и проведения пуска, предпочтительнее первого варианта.

Предложенная методика позволяет обосновать состав локальных критериев, характеризующих РК, и построить обобщенный качественно-количественный критерий для ранжирования основных вариантов модернизации РК.

Значения обобщенного критерия основных и других потребительских характеристик, а также результаты маркетинговых исследований служат базой для обсуждения и принятия корпоративного решения об основных вариантах модернизации РК.

1. Дегтярев О.В. Особливості ціноутворення на продукцію і послуги ракетно-космічної галузі // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Економіка. – Київ. – ВПЦ Київський університет". – 2002. – Вип.. 55-57. – С. 86-89.
2. Конохов С.Н., Федякин А.И. Вероятностно-статистические методы проектирования систем космической техники. – Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 1997. – 250с.
3. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решения при многих критериях предпочтения и замещения. Пер. с англ./ Под ред. Шахнова И.Ф. – М. Радио и связь, 1981. – 560с.
4. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006. – 181с.
5. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 198с.
6. Ларичев О.И., Прохоров А.С., Петровский А.Б., Стернин М.Ю., Шепелев Г.И. Опыт планирования фундаментальных исследований на конкурентной основе // Вестн. АН СССР. 1989. – №7. – С 57-61.

Государственное предприятие –
Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля,
Днепропетровск,

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 19.04.12,
в окончательном варианте 14.05.12