

УДК 629.7.027::629.764:519.1

**К.В. БЕЗРУЧКО<sup>1</sup>, И.Г. БУРЫМ<sup>1</sup>, А.О. ДАВИДОВ<sup>1</sup>, В.П. ФРОЛОВ<sup>2</sup>,  
С.В. ШИРИНСКИЙ<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *Государственное предприятие «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина*

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМОДРОМОВ И ИХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В работе рассмотрена методика оценки эффективности современных космодромов на этапе их проектирования при выборе вариантов реализации подсистем, входящих в их состав. Оценка эффективности космодрома проводилась с помощью математической модели, основанной на применении метода графов. Данная модель позволяет выбрать, из множества различных вариантов реализации подсистем именно те, при которых эффективность космодрома в целом будет максимальной. Выбор необходимых вариантов реализации подсистем осуществлялся посредством поиска пути максимальной эффективности в составленном графе. Также в работе показан пример оценки эффективности космодрома по рассмотренной методике.*

**Ключевые слова:** космодром, эффективность, граф, стартовый комплекс, технический комплекс, подсистема.

### Введение

В связи с тем, что многие страны хотят иметь собственный космодром в пределах от 10° до 20° северной широты, остро встает вопрос о необходимости оценки эффективности проведения проектных работ. При проведении данной оценки должны учитываться стоимость запуска, энергетические затраты, надежность проектируемых систем и т.д. Таким образом, задача оценки эффективности научных космических проектов является важной проблемой, от успешного решения которой зависит достоверность выводов о социальной и экономической эффективности планируемых и выполненных работ [1, 2]. В данной работе рассмотрена методика оценки эффективности космодромов на этапе их проектирования, предложенная и разработанная авторами.

Оценка эффективности проектов производится, как правило, в трех случаях:

- 1) при отборе проектов, когда работа над ними еще не начиналась;
- 2) в процессе выполнения проектов с целью оптимизации менеджмента;
- 3) после выполнения проектов, когда исследования завершены, и можно проследить результаты внедрения этих исследований.

Разработанную авторами методику, при некоторой модификации, можно применить во всех упомянутых случаях. Однако данная статья посвящена оценке эффективности проектов при отборе проектов на начальном этапе работ.

Обычно задача оценки проекта и задача оптимизации проекта объединяются для получения конечной цели: сопоставления оценок нескольких альтернатив и выборе лучшей из них. При такой постановке не рассматривается случай оценки единственного (уникального) проекта. Отличительная черта предлагаемой методики - возможность получения наиболее эффективного варианта построения рассматриваемой системы (космодрома).

### 1. Пример обобщенной структуры космодрома

Для оценки эффективности космодромов первоначально необходимо составить его структурную схему. В типовую структуру космодрома обычно входят следующие основные системы [3, 4]: технический комплекс, заправочно-технические позиции, стартовый комплекс, комплекс траекторных измерений и управления полетом ракеты-носителя, комплекс траекторных и телеметрических измерений полета космического аппарата в космосе, хранилища компонентов ракетного топлива, внутренние автомобильные и железные дороги, системы охраны территории ракетно-космического комплекса и др.

Перечисленные комплексы и подразделения размещаются на территориях космодромов, имеющих основную площадь в десятки квадратных километров. Для обеспечения синхронизации работы всех систем в едином масштабе времени в состав космодрома входит комплекс системы единого времени.

Типовая структура космодрома представлена на рис. 1.

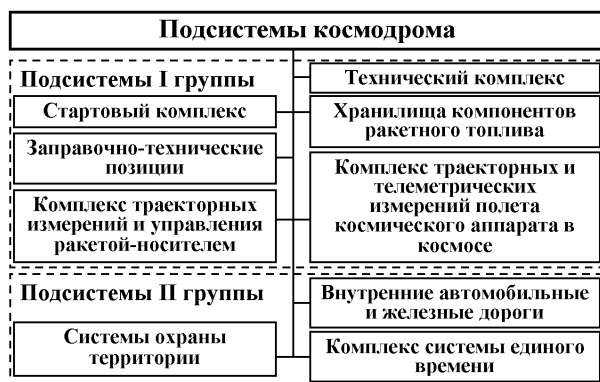


Рис. 1. Типовая структура космодрома

Как показывает опыт, рассмотренные подсистемы космодрома можно разделить на две группы:

1) подсистемы, при изменении которых происходит существенное изменение эффективности всего космодрома (технический комплекс, стартовый комплекс, заправочно-технические позиции; хранилища компонент ракетного топлива; комплексы траекторных, телеметрических измерений и управления полетом ракеты-носителя и космического аппарата в космосе);

2) подсистемы, при изменении которых эффективность космодрома существенно изменяться не будет (внутренние и автомобильные дороги, системы охраны территории).

Соответственно, для оценки эффективности космодрома в дальнейшем мы будем рассматривать только подсистемы из первой группы.

## 2. Оценка эффективности космодромов на этапе проектирования

Рассмотрим задачу поиска наиболее эффективной структуры космодрома на этапе его проектирования. Мы имеем множество различных вариантов реализации его подсистем, вид которых, например, будет изменяться в зависимости от способа транспортировки и сборки ракеты-носителя (вертикальный или горизонтальный), и перед нами стоит вопрос о выборе тех вариантов реализации, при которых эффективность космодрома в целом будет максимальной. В состав космодрома входят все подсистемы, представленные на рис. 1. Рассматривать мы будем подсистемы, входящие только в первую группу. Допустим, мы имеем 3 варианта реализации технического комплекса, 3 варианта стартового комплекса, 3 варианта заправочно-технических позиций, 2 варианта реализации комплекса траекторных измерений и управления полетом ракеты-

носителя, 2 варианта комплекса траекторных и телеметрических измерений полета космического аппарата в космосе, 3 варианта хранилищ компонент ракетного топлива. Для оценки эффективности космодрома в данном случае удобно использовать следующее выражение, которое основано на сравнении с некоторым эталоном (идеализированным вариантом) [5]:

$$E = \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{k_1} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{k_2} \cdot \left( \frac{C_a}{C_0} \right)^{-k_3}, \quad (1)$$

где  $E$  – безразмерный показатель эффективности;

$P_a$  и  $P_0$  – технический показатель, который выбирается в зависимости от предназначения определенной системы (производительность, мощность и т.д.) анализируемого и идеального варианта;

$P_a$  и  $P_0$  – показатели надежности;

$C_a$  и  $C_0$  – показатели затрат;

$k_1, k_2, k_3$  – весовые коэффициенты, определяемые экспертным путем.

В качестве идеализированных параметров примем максимальное значение технического эффекта и надежности ( $P$  и  $P$ ) и минимальное значение стоимости ( $C$ ) среди всех вариантов исполнения подсистем.

Допустим мы уже имеем значения технического показателя, надежности и показателя затрат, входящих в выражение (1), для каждого варианта реализации систем.

Для решения вопроса об оптимальном выборе вариантов реализации систем космодрома согласно [6] наибольший практический интерес представляет математическое моделирование как основное средство исследования эффективности. Напрямую выражение (1) для оценки эффективности подсистем использовать нельзя, так как нам нужно найти именно необходимое их сочетание, чего одно это выражение не обеспечивает. В самом общем виде, модель, используемая при обосновании решения, может быть представлена как отображение определенного вида множества стратегий на множество исходов [7].

Для решения задачи оценки эффективности можно воспользоваться теорией графов. Общий вид графа представлен на рис. 2.

На данном графе показано  $N$  систем, входящих в состав космодрома (технические комплексы, заправочно-технические позиции, стартовые комплексы и т. д.). Каждая система имеет  $m$  различных вариантов исполнения. Для каждой вершины ( $j, i$ ), согласно [8], определены числа ( $\mathcal{E}_{j,i}, S_{j,i}$ ), интерпретируемые как эффект при выборе определенного вида системы ( $\mathcal{E}_{j,i}$ ) и затраты ( $S_{j,i}$ ) на соответствующую систему.

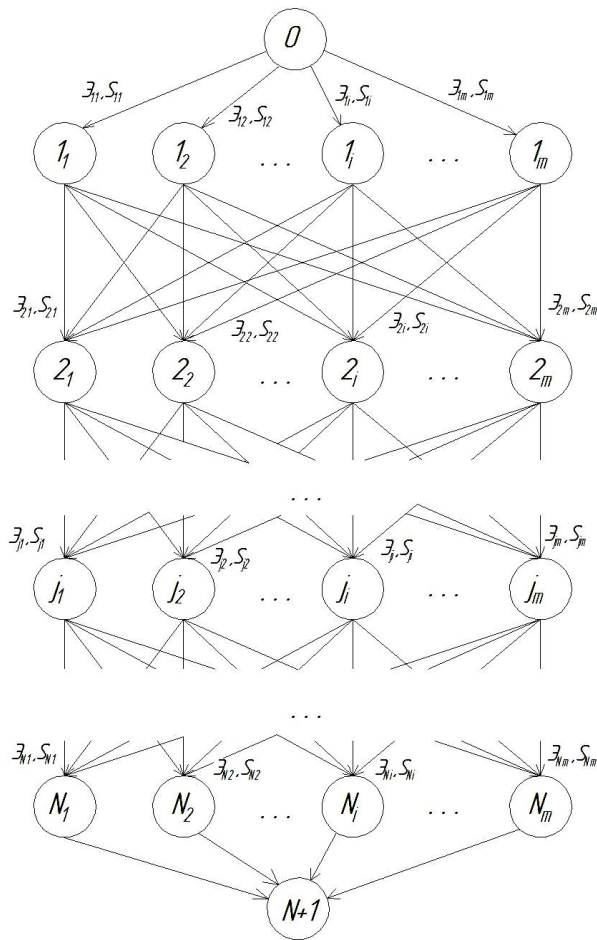


Рис. 2. Граф поиска наиболее эффективной структуры космодрома

Эффективность  $E(\mu)$  пути  $\mu$  определяется как отношение его эффекта  $\mathcal{E}(\mu) = \sum_{\mu} \mathcal{E}_{j,i}$  к затратам

$$S(\mu) = \sum_{\mu} S_{j,i}, \text{ то есть } E(\mu) = \mathcal{E}(\mu) / S(\mu). \text{ Задача за-}$$

ключается в поиске пути  $\mu^*$  максимальной эффективности:  $E(\mu^*) \rightarrow \max$ . Те вершины графа, через которые мы проходим при нахождении пути максимальной эффективности, и есть те варианты реализации систем космодрома которые необходимо выбрать.

Необходимо также решить вопрос об определении  $\mathcal{E}_{j,i}$  и  $S_{j,i}$  для каждого варианта исполнения системы. Данные величины будем рассматривать как безразмерные, и находить с помощью выражения (1) представленного выше, приняв, что  $E = \mathcal{E} / S$ . Следовательно:

$$\mathcal{E} = \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{k_2}, S = \left(\frac{C_a}{C_0}\right)^{k_3}. \quad (2)$$

Граф для оценки эффективности и выбора наиболее эффективной структуры космодрома в нашем случае показан на рис. 3.

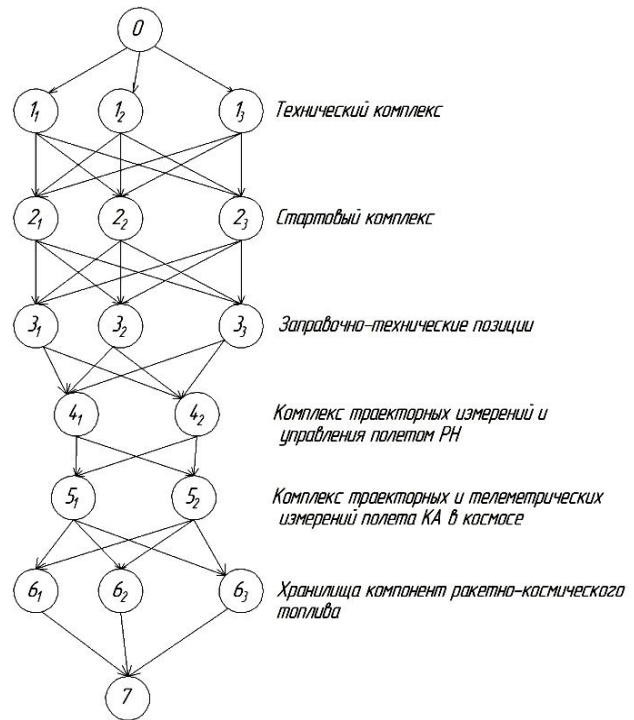


Рис. 3. Граф для оценки эффективности космодрома

Дальнейшая задача заключается в поиске пути максимальной эффективности. Для этого необходимо рассчитать эффективность каждого из вариантов технического комплекса и разместить результаты расчета на графе. Пример результатов такого расчета приведен на рис. 4. Здесь, на рисунке, ниже вершин показаны значения эффективности, которая получается при проходе через соответствующую вершину, а выше вершин показан путь.

Далее необходимо рассчитать эффективности систем, которые получаются при выборе различных вариантов стартовых комплексов с различными вариантами технических комплексов, и разместить результаты расчета на графе (рис. 4). На рисунке ниже вершин, характеризующих различные варианты стартовых комплексов, показаны по три значения эффективности, в зависимости от того, какой перед этим выбран технический комплекс. Жирной линией выделен наиболее эффективный вариант. Выше вершин показан наиболее эффективный путь (номера вершин, через которые мы проходим).

Аналогично проводятся расчеты для выбора остальных систем космодрома и поиска пути максимальной эффективности. В результате всех расчетов определяется путь максимальной эффективности, который изображен на рис. 4 жирной линией. Вершины графа, через которые проходит путь максимальной эффективности и есть те варианты реализации систем космодрома, при выборе которых эффективность космодрома в целом будет максимальной.

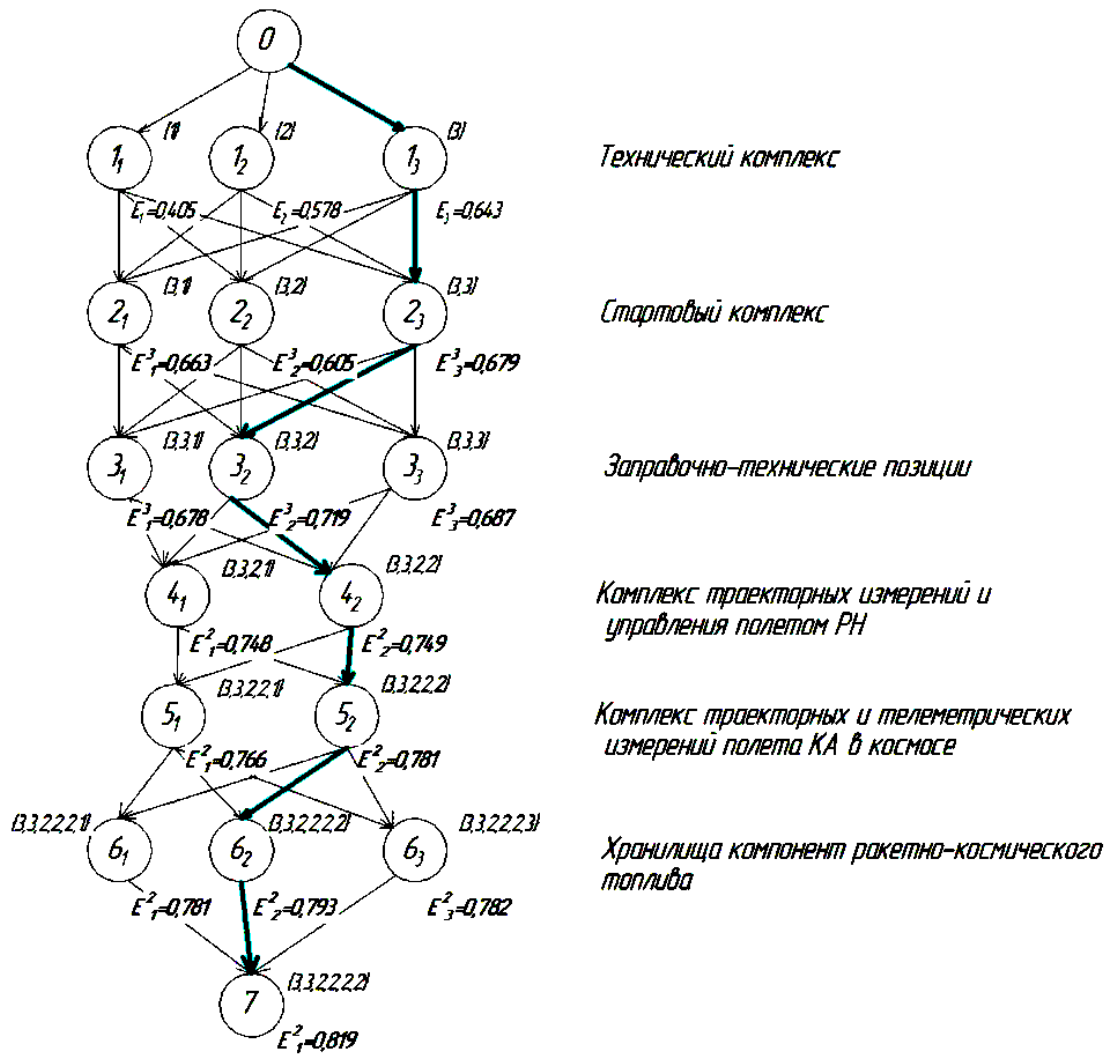


Рис. 4. Путь максимальной эффективности

### Заключение

Эффективность варианта построения сложной системы должен оценивать специалист, знакомый с системой в целом, знающий ее назначение и требования к ней. При оценке эффективности построения системы необходим определенный навык в практическом применении методов ее исследования. Как и все задачи по исследованию, оценка эффективности построения какой-либо определенной системы является задачей конкретной.

В общих чертах порядок расчета эффективности сложных систем по рассмотренной методике заключается в следующем:

- определяется назначение системы;
- выясняется круг возможных задач и условий работы системы;
- выбирается приемлемая количественная мера качества построения системы;
- производятся разбиение сложной системы на отдельные элементы (подсистемы);

- составляется структурная схема системы;
- отбираются подсистемы, изменение которых существенно влияет на эффективность всей системы в целом;
- строится граф оценки эффективности;
- вычисляются показатели надежности, затрат и технического эффекта подсистем;
- находится путь максимальной эффективности;
- выбираются те варианты реализации подсистемы, которые находятся в узлах пути максимальной эффективности.

### Литература

1. Надежность и эффективность в технике : справ. Т. 3: Эффективность технических систем [Текст] / ред. совет: В.С. Авдеевский (председатель), В.И. Кузнецов, Н.Д. Кузнецов и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
2. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность) [Текст] /

В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 216 с.

3. Бирюков, Г. П. Основы построения ракетно-космических комплексов [Текст] / Г.П. Бирюков, В.Н. Кобелев. – М.: Изд-во МАТИ им. К. Э. Циолковского, 2000. – 294 с.

4. Бирюков, Г.П. Эксплуатация стартовых комплексов по фактическому состоянию [Текст] / Г.П. Бирюков, Ю.М. Зброжек. – М.: Изд-во МАТИ им. К. Э. Циолковского, 2001. – 273 с.

5. Бирюков, Г.П. Элементы теории проектирования ракетно-космических комплексов [Текст] /

Г.П. Бирюков, В.И. Симонов. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – 288 с.

6. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем [Текст] / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.

7. Ушаков, И.А. Методы расчета эффективности систем на этапе проектирования [Текст] / И.А. Ушаков. – М.: Знание, 1983. – 92 с.

8. Райнике, К. Оценка надежности систем с использованием графов [Текст] / К. Райнике, И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.

Поступила в редакцию 29.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. 401 А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КОСМОДРОМІВ ТА ЇХ СИСТЕМ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

*К.В. Безручко, І.Г. Бурим, А.О. Давідов, В.П. Фролов, С.В. Ширинський*

В статті розглянуто методику оцінки ефективності сучасних космодромів на етапі їх проектування при виборі варіантів реалізації підсистем, які входять до їх складу. Оцінка ефективності космодрома проводилась за допомогою математичної моделі, яка заснована на використанні метода графів. Данна модель дозволяє вибрати, з безлічі різноманітних варіантів реалізації підсистем саме ті, при яких ефективність космодрома в цілому буде максимальною. Вибір необхідних варіантів реалізації підсистем здійснювався за допомогою пошуку шляху максимальної ефективності у складеному графі. Також в статті показано приклад оцінки ефективності космодрома проведений за допомогою розглянутої методики.

**Ключові слова:** космодром, ефективність, граф, стартовий комплекс, технічний комплекс, підсистема.

### METHOD OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF SPACEPORTS AND THEIR SYSTEMS DURING THE DESIGN PHASE

*K.V. Bezruchko, I.G. Buryim, A.O. Davidov, V.P. Frolov, S.V. Shirinskiy*

Methods of assessing the efficiency of modern spaceport at the design stage by selecting the options subsystem implementations, part of them considered in this article. Evaluating the effectiveness of spaceport was carried out using a mathematical model based on the method of graphs. The developed model allows you to choose from a variety of different embodiments of the subsystems are the ones in which the effectiveness of the spaceport in general will be the maximum. Selection of the necessary embodiment of subsystems implemented by searching for ways to maximize the effectiveness of compiled graph. Example of evaluation according to the spaceport discussed techniques are also shown in the article.

**Key words:** spaceport, efficiency, graph, launcher, technical complex, subsystem.

**Безручко Константин Васильевич** – д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Бурим Иван Григорьевич** – студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Давидов Альберт Оганезович** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Фролов Виктор Петрович** – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора и начальника КБ-1, начальник отдела СО-11, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

**Ширинский Семен Владимирович** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.