
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
СОВРЕМЕННОГО ЭТАПА РАЗВИТИЯ
КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

© 2015 г. В.В. Миронов, М.Ю. Новикова¹

(Рязань)

Представлен экономико-математический анализ развития поколений космических ракет-носителей (КРН), реализованный на примере деятельности ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ Прогресс”» и смежных предприятий космической отрасли. На большой статистической базе данных создана математическая модель эволюции КРН, которая соответствует законам развития больших систем. На основе модели с учетом экспертных оценок осуществлен временной прогноз смены поколений ныне действующих КРН. Анализируется соответствие этого прогноза современной практике космической отрасли.

Ключевые слова: экономико-математические методы, космические ракеты-носители, прогноз развития.

Классификация JEL: C02, C69.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема анализа функционирования и перспектив развития больших экономических, научно-технических или производственных систем, в частности отрасли космических ракет-носителей (КРН), хорошо известна и по-прежнему актуальна (Макаров, 2011; Львов и др., 1996).

В контексте этой глобальной проблематики авторами решена задача анализа этапов развития ракет-носителей на примере деятельности ГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ Прогресс”» и осуществлен прогноз смены поколения КРН. Использование в соответствии с тенденциями, отмеченными в (см., например, (Журавин, 2012; Foster, 1986)), различных методов научно-технического и экономического прогнозирования показало необходимость сочетать статистические и эвристические методы.

Задачи исследования: 1) проанализировать эмпирические данные экономического и технического характера, предоставленные «ГНПРКЦ “ЦСКБ Прогресс”» и смежными предприятиями, изучить структуру и особенности данных; 2) предложить метод построения математической модели эволюции КРН и осуществить временной прогноз смены поколений КРН на перспективу; 3) осуществить различные математические решения в рамках принятой методологии, провести сравнительный анализ результатов; 4) дать оценку качества прогноза, т.е. сравнить теоретические результаты экстраполяции с новейшими, реальными, открытыми данными по развитию КРН.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

2.1. Анализ эмпирических данных. Авторы сформировали обширную информационную базу данных для прогноза в рамках жизненного цикла (ЖЦ) одного поколения КРН и выделили наиболее значимые характеристики КРН. Каждой характеристике присваивается коэффициент значимости, который влияет и на конкурентоспособность, и на возможность наращивания дан-

¹ Авторы выражают глубокую благодарность Н.Н. Добычину за постановку задачи и предоставленные данные экономического и научно-технического характера, а также В.И. Терехину за консультации по экономическим вопросам и К.В. Мироновой за помощь в компьютерном моделировании и оформлении работы.

ной характеристики. При этом в силу специфики производства и значимости решаемых задач исчерпание возможностей какой-то из основных систем (характеристик) КРН приводит к необходимости замены или коренной модернизации всей линейки КРН. Одной из таких характеристик является контрольно-проверочная аппаратура (КПА) функционирования КРН.

В работе дан прогноз развития существенного блока КРН – КПА летных испытаний (КПА ЛИ). При проведении летных испытаний на первый план выходят интенсивность проводимых проверок (максимально возможное число проверок в единицу времени) и их качество (например, повышение точности измерений). Наиболее значимыми характеристиками КПА при проведении летных испытаний ракет-носителей являются: число типов проверяемых параметров в реальном времени; число параметров, обрабатываемых в единицу времени; число каналов управления; достоверность передачи информации; вероятность безотказной работы; объемы зарегистрированной информации.

Данные, которые авторы собрали и свели в табл. 1, характеризуют динамику изменений тактико-технических характеристик КПА ЛИ на исследуемых предприятиях за 40 последних лет для комплексов САУИ, КСА НИСИ, НИУКСИ, АКА НИСИ, АНИК (аббревиатура конкретных специализированных систем контрольно-проверочной аппаратуры или систем контрольно-измерительной аппаратуры для соответствующих ракет-носителей, названия которых вынесены в заголовки столбцов, например, МБР “Зенит” – межконтинентальная баллистическая ракета с именем “Зенит”) с учетом времени их исполнений и исполнителей. Для объективной оценки уровня развития техники учитывались характеристики аналогичной техники отечественных и зарубежных конкурентов, что также отражено в таблице. Учитывая тот факт, что новые параметры техники не появлялись, а рост имеющихся показателей был плавным, считалось, что указанные группы контрольно-проверочной аппаратуры развивались в рамках одного поколения КРН.

Заметим, что разрабатываемая техника КПА для КРН имеет одно функциональное назначение, относится к одному параметрическому ряду, период времени ее существования и развития невелик, а число разработанных образцов ограничено. Как следствие – при проведении прогнозного исследования допустимо построение единой логистической кривой для анализа зависимости, характерной для анализа больших систем, в частности таких, как производство и испытание КРН.

2.2. Математическая модель. Авторами выделены три уровня (или поколения) аппаратуры контроля. В работе эти уровни не обсуждаются. Отметим только, что для анализируемого сегмента КПА, имеющей единое функциональное назначение и относящейся к одному параметрическому ряду, допустимо построение некоторого универсального критерия качества, который ниже обозначается $K_{\text{ты}}(t)$. Таким образом, в работе осуществлен переход от многокритериального оценивания к однокритериальному оцениванию.

В соответствии с теорией оценивания параметров больших систем метод моделирования критерия $K_{\text{ты}}(t)$ или $K_{\text{ты}}(t + t_0)$, если зафиксирован сдвиг во времени относительно начального момента t_0 , основан на выявлении соответствия между множеством локальных, относительных характеристик изделий и интегральными оценками их технического уровня, которые связаны общей зависимостью вида

$$K_{\text{ты}} = \phi(X_1, \dots, X_n, \Omega, t), \quad (1)$$

где $\phi(X_1, \dots, X_n, \Omega, t)$ – числовая функция, выражающая связь (зависимость) экономических и научно-технических характеристик исследуемых образцов; аргументы функции имеют следующее “содержание”: $X_1, \dots, X_n$ – числовые значения исследуемых технических характеристик; параметр Ω – коэффициент приоритета, отражающий значимость характеристик качества новой техники, которые ранее имели низкий приоритет или даже вовсе отсутствовали; t – параметр времени.

С учетом природы зависимости (1) эмпирические интегральные значения $K_{\text{ты}}(t)$ (или “измерения”) в фиксированные моменты времени для каждого комплекса вычисляются по формуле

$$K_{\text{ты}} = \sum_{j=1}^m \frac{x_{jt}}{x_{jo}} \alpha_j = \sum_{j=1}^m \bar{x}_{jt} \alpha_j, \quad (2)$$

Таблица 1. Характеристики техники, разработанной ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ Прогресс» и предприятиями-конкурентами за период 1975–2011 гг.

Характеристика	Коэф- фициент значимости параметра, α_j	Комплексы контрольно-проверочной аппаратуры / годы							
		АСКС (И7, 1973–1980)	АСКСИМ (МР «Вовода», 1986–1990)	АСКСИМ-01 (МР «Зенит», 1996–1998)	САУИ-УМ (МР «Тополь-М», 1997)	КСА НИ СИ (КРК «Про- тон-М», 1998– 2000)	НИУКСИ (КРК «Союз-2», 2002–2003)	АКА НИСИ (КРК «Ангара», 2005–2006)	Русь-М, (НИУКСИ-В, 2010)
Число типов прове- ряемых параметров	0,25	4	4	6	8	8	8***	16	19
Число проверяемых параметров	0,05	56	62	128	128	136	128	256	256
Число каналов управ- ления	0,15	2	6	6	12	36	32	32	42
Максимальная точность измерений	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	0,9	0,95	0,95
Вероятность безотказной работы	0,3	0,95	0,95	0,95	0,98	0,98	0,97	0,99	0,99
Объемы зарегистрирован- ной информации, Гб	0,05	0,03	0,03	0,05	0,08	1	1	2	4

Примечание 1. Информация в столбцах, элементы которых помечены символами «*», относится к характеристикам техники, вынесенной в заголовок столбца, которая разрабатывалась соответствующими отечественными и зарубежными предприятиями-конкурентами: * – Научно-производственное объединение измерительной техники (ОАО «НПО ИТ»); ** – Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (РНИИ КП); *** – Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета (НИЦ СПб ЭТУ); **** – European Aeronautic Defense and Space Company (EADS) – Европейский аэрокосмический и оборонный концерн.

Примечание 2. Наличие подстолбцов говорит о модернизации системы в рамках одного изделия (вынесенного в заголовок столбца) за соответствующий период времени.

Таблица 2. Интегральная оценка технического уровня изделий

Год	1976	1988	1996	1998	2000	2002	2006	2011
Значение $K_{\text{ты}}$	1,000	1,623	1,523	4,265	5,590	5,748	9,932	12,023

где m – число исследуемых характеристик образцов; x_{jt} – значение технической характеристики j в заранее определенный момент времени t ; x_{j0} – базовое значение технической характеристики j (параметры первой системы автоматического сбора и контроля информации); $\bar{x}_{jt}$ – относительное значение технической характеристики j в момент времени t ; α_j – коэффициент значимости параметра.

Расчетные данные, полученные по формуле (2) и необходимые для последующего анализа, сведены в табл. 2.

Для того чтобы на основании данных табл. 2 осуществить выравнивание динамических рядов, необходимо и достаточно найти вид эмпирической параметрической функции (тип кривой сглаживания) и определить числовые значения параметров этой функции. Анализ эволюции данных $K_{\text{ты}}(t)$ на основе данных табл. 2 и анализ “природы” функции $K_{\text{ты}}(t)$ на основе формулы (2) приводит к выводу, что функция $K_{\text{ты}}(t)$ адекватно соответствует закону эволюции больших технических систем.

В самом деле, функция $K_{\text{ты}}(t)$ возрастает на всей области определения, т.е. при всех $t \geq t_0$. В приводимом анализе начальной точкой отсчета по определению полагается $t_0 = 1975$ (год); скорость возрастания функции $K_{\text{ты}}(t)$ пропорциональна самой функции; скорость возрастания функции $K_{\text{ты}}(t)$ пропорциональна (при прочих равных условиях) количеству доступных ресурсов. Таким образом, второй член искомого уравнения должен отражать конкуренцию за ресурсы, которая ограничивает рост функции.

Дальнейшее сравнение с известными аналогами позволяет с достаточной степенью уверенности заключить, что функция $K(t) = K_{\text{ты}}(t)$ удовлетворяет уравнению Ферхюльста – фундаментальному уравнению в теории больших систем:

$$\frac{K(t)}{dt} = rK(t) \left(1 - \frac{K(t)}{K_{\max}} \right), \quad (3)$$

где r – некоторый коэффициент, характеризующий скорость роста функции, а $K_{\max}$ – максимально возможное значение $K(t)$.

Решением уравнения (3) при естественных начальных данных является так называемая логистическая функция (логистическая или S-образная кривая), которую, имея в виду характер “измерений” (2), сведенных в табл. 2, при очевидном обозначении параметров представим в виде

$$K_{\text{ты}}(t) = \frac{P}{1 + be^{-a(t-t_0)}}. \quad (4)$$

В формуле (4) P , a , b – числовые параметры, характеризующие темпы нарастания технического уровня и его начальный уровень, соответствующий моменту начала разработки первого образца соответствующего поколения техники в момент $t = t_0$. Учет параметров КПА, разрабатываемой предприятиями-конкурентами, заключается в том, что при построении кривой развития выбираются параметры техники, обладающей лучшими характеристиками.

2.3. Математические решения, сравнение результатов, прогноз на перспективу. Предложим вначале аналитические методы расчета параметров логисты для поколения техники по интегральному показателю научно-технического уровня разработок. Вопрос о выборе метода оценки параметров P , a и b в модели (4) решается экспертом (в ручном или автоматическом режиме) на основе априорных данных о характере ошибок измерений функции $K(t)$. Так, если ошибки измерений подчинены закону Лапласа или вообще коррелированы произвольно, то предпочтительно (имея в виду точность оценивания) использовать специальный полиномиальный по слож-

ности алгоритм в рамках метода наименьших модулей (МНМ) (Миронов, 2010). В классических случаях (нормальный закон распределения) предпочтение отдается методу наименьших квадратов (МНК).

Линеаризация. Иногда бывает возможным величину P оценить приближенно без взаимосвязи с оценкой параметров a и b . Например, величину P можно просто подобрать эвристически, исходя из сущности развития явления, описываемого логистой (4), как, например, физические законы и константы, естественные пределы насыщения, ограниченность природных и людских ресурсов и т.п. Таким образом, проводится некоторая линеаризация задачи. Покажем, что этот широко известный прием линеаризации для МНК, вообще говоря, может оказаться неприемлемым для части из рассматриваемых проблем.

В самом деле, предположим, что величина P для функции (4) найдена тем или иным способом. Тогда система нелинейных уравнений для определения оставшихся параметров a и b выглядит следующим образом:

$$P/(1 + b \exp[-a(t - t_0)]) = K_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где $K_i = K_{\text{ты}}(t_i)$, значения t_0 и n заданы.

Ясно, что априори $P \neq 0$, и, как следует из формулы (5), для любого индекса $i = 1, \dots, n$ значения $K_i \neq 0$. Из (5) легко следует, что для любого индекса $i = 1, \dots, n$ отношение $P/K_i > 1$, что дает возможность ввести в рассмотрение выражения $\ln(P/K_i - 1)$. Введем обозначение $T_i = t_i - t_0$, тогда систему (4) можно представить в виде

$$\ln b - T_i a = \ln(P/K_i - 1), \quad i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Введем обозначения: $c = \ln b$, $d_i = \ln(P/K_i - 1)$ для любого $i = 1, \dots, n$. Тогда систему (6) можно представить в линейном матричном виде:

$$AX = D, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & -T_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & -T_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} c \\ a \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 \\ \dots \\ d_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Следовательно, классическая МНК-оценка вектора X может быть выражена в виде произведения:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T D. \quad (8)$$

Вычислив координаты вектора $X = [X_1, X_2]^T$ по формуле (8), легко найти искомые оценки параметров логистической кривой (4):

$$a = X_2, \quad b = \exp(X_1). \quad (9)$$

Дальнейшее обоснование выбора метода оценивания проиллюстрируем уже методом компьютерного моделирования.

2.4. Компьютерное решение задачи. По данным табл. 2 оценим параметры P , a , $b > 0$ логистической функции (4), где значение $t_0 = 1975$ априори задано. Компьютерное моделирование осуществлялось двумя способами и в двух разных “средах”.

Первый способ. Параметры нелинейной логистической кривой (4) рассчитывались ввиду небольшой размерности задачи “сразу” численно по МНК на основе специальной программы, встроенной в вычислительный комплекс программ MathCad 15.0.

Результаты моделирования (с точностью до трех знаков после запятой) таковы: $P = 14,471$, $b = 360,448$, $a = 0,210$. При этом сумма квадратов невязок экспериментальных и теоретических данных (критерий качества МНК) составила $\Omega = 4,741$.

Таким образом, получили следующий вид логистической функции (4):

$$K_{\text{ты}}(t) = \frac{14,471}{1 + 360,448 e^{-0,210(t-t_0)}}.$$

На рис. 1 представлены график логистической кривой, экспериментальные точки и асимптота насыщения. Видно, что насыщение исследуемого процесса происходит в районе 2020 г. (на графике 1975 г. обозначен нулем).

Второй способ. Вычисление параметров по предложенному выше “линеаризированному” алгоритму. Значение $P = 15,0$ определялось эвристически.

В соответствии с предписанием алгоритма данные табл. 2 представлялись в удобном для моделирования формате (табл. 3).

Расчеты осуществлялись по формулам (8) и (9) на вычислительном комплексе MathCad 2000 Professional. Искомые оценки тех же параметров таковы: $a = 0,121$, $b = 31,609$; при этом сумма квадратов невязок экспериментальных и теоретических данных (критерий качества МНК) составила $\Omega = 13,541$.

Как видно из результатов моделирования, сама задача является неустойчивой в отношении параметров a и b в силу того, что, во-первых, абсолютные величины элементов псевдообратной матрицы $(A^T A)^{-1} A^T$ из формулы (8) велики, а во-вторых, предпринятая “линеаризация” повлияла на точность оценивания, поскольку функционалы качества в обоих случаях существенно различаются (количественная мера этого расхождения не изучалась, для “доказательства” утверждения достаточно рассмотреть виды обоих функционалов).

В то же время особо отметим, что неустойчивость по отношению к параметрам a и b не влияет на устойчивость прогноза развития отрасли в целом и оценка насыщения исследуемого процесса, как и в первом случае, приходится на 2020 г.

Одновременно отметим, что арифметическая сложность алгоритма (число выполненных арифметических операций) составила $O(n^6)$, что на порядки меньше числа элементарных операций в первом численном методе.

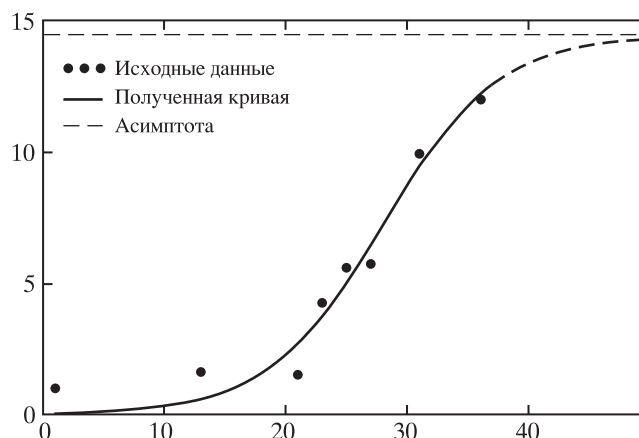


Рис. 1. График логистической кривой развития текущего поколения техники (по горизонтали указаны годы, начиная с “нулевого” года (1975 г.), а по вертикали – интегральное значение K_{ry})

критерий качества МНК) составила

3. ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗА

3.1. Оценки I. В первой части работы проведен анализ этапов развития аппаратуры для КРН на примере ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ Прогресс”» и смежных предприятий и осуществлен прогноз времени смены очередного поколения КРН. Анализ показал, что к 2020 г. уровень развития КРН достигает своего насыщения. Таким образом, уже с 2015 г. нецелесообразно продолжать разработку аппаратуры контроля КРН и производство образцов КРН в рамках старых технологий, следует начинать подготовку предприятий к созданию новых КРН и нового поколения КПА, которое будет характеризоваться значительным ростом интегрального показателя $K_{ry}(t)$ в рамках тех же критериев качества.

Таблица 3. Расчетные данные для вычисления параметров логистической кривой

Параметры	Год							
	1976	1988	1996	1998	2000	2002	2006	2011
T_i	1	13	21	23	25	27	31	36
K_i	1,000	1,623	1,523	4,265	5,590	5,748	9,932	12,023
$s_i = P/K_i - 1$	14,000	8,242	8,849	2,517	1,683	1,610	0,510	0,248
$d_i = \ln(s_i)$	2,639	2,109	2,180	0,923	0,521	0,476	-0,673	-1,396

Таблица 4. Данные об экспертах и данные экспертного анализа перспектив развития КПА

№ (условное имя) эксперта	Уровень компетентности эксперта	Начальный участок логистической кривой	
		Время появления нового поколения КПА $T_{\text{смены поколений}}$ год	Технический уровень нового поколения КПА на начальном этапе, $K_{\text{ту}}$
1	0,8	2016	17
2	0,6	2014	15
3	0,6	2014	16
4	0,6	2015	19
5	0,5	2020	20
6	0,8	2021	16
7	0,7	2013	16
8	0,8	2016	16
9	0,8	2013	17
10	0,9	2015	18
11	0,5	2019	20
12	0,7	2013	17
13	0,7	2020	16
14	0,9	2014	17
15	0,8	2015	18
Интегральный уровень прогнозируемых величин		2016	17,103

Обычно формирование технических требований к новым изделиям – область компетенции заказчика, а определение предельно достигаемых величин технических характеристик – компетенция разработчика. Разработчик определяет соответствие потребностей и возможностей, и поэтому именно он должен самостоятельно составить свое представление о тактико-технических характеристиках, которые ему предстоит обеспечить в будущем. Нередко прогнозы дальнейшего развития техники и требуемого уровня разрабатываемой КПА разработчиков оказываются более достоверными, чем прогнозы заказчика. Тем более что определение соответствия потребности возможностям базируется на технико-экономическом обосновании, выполнение которого становится возможным только после получения прогноза.

В результате выполненного экономико-математического прогноза перспектив развития КПА и КРН получен конкретный вид логистической кривой (см. рис. 1), описывающей динамику интегрального показателя технического уровня $K_{\text{ту}}$ *текущего поколения* космических ракет-носителей. Момент начала проведения организационных изменений и их масштабы определяются начальным участком логистической кривой развития *следующего поколения* КПА и КРН.

Для построения такой кривой необходимо дополнить результаты, полученные методом экстраполяции, результатами экспертной оценки перспектив развития КПА. Данные, полученные в ходе опроса авторами группы из 15 ведущих специалистов разрабатывающего предприятия, приведены в табл. 4. Уровень компетентности (столбец 2) определялся с учетом самооценки экспертов (проводимой авторами работы доверительно) и их взаимной оценки (проводимой авторами работы анонимно).

Интегральный уровень прогнозируемых величин, получаемых путем экспертного опроса специалистов, вычислялся по следующей формуле (Анискин, 2002):

$$X_{\text{инт}} = \left(\sum_{i=1}^n x_i k_i \right) / \left(\sum_{j=1}^n k_j \right), \quad (10)$$

где $X_{\text{инт}}$ – прогнозное значение искомого параметра; x_i – значение прогнозируемого параметра, по мнению эксперта i ; k_i – уровень компетентности эксперта i .

Таким образом, полученные данные позволяют решить задачу прогнозирования времени перехода к новому поколению техники и величины скачка параметра $K_{\text{ту}}$.

Графически этот экономико-математический анализ отражен на рис. 2, на котором указаны годы возможного перехода на новое поколение КРН, уровень скачка коэффициента $K_{\text{ту}}$, а также некоторые данные динамики (скорости) процесса.

Результаты моделирования и экспертного прогноза:

– в 2016 г. ожидается переход к новому поколению КРН;

– $K_{\text{ту}}$ техники следующего поколения возрастет примерно в 1,4 раза и достигнет значения $K_{\text{ту}} = 17$.

3.2. Оценки II. Оценка необходимых изменений внутренней среды должна основываться на сопоставлении достигнутых характеристик НТП разрабатывающего предприятия с требованиями внешней среды. Для этого в составе разрабатывающего предприятия мы гипотетически выделяем три базисные подсистемы функционирования: структурную, процессную и технологическую. В основу предлагаемого инструментария наращивания конкурентных преимуществ положен метод управления механизмом реструктуризации (Foster, 1986). Все изменения на предприятии разделяем (это – внутренняя подзадача, решаемая авторами) по функциональному признаку на три группы в соответствии с вышеуказанной классификацией.

Объем необходимых *технологических изменений* определяется путем сопоставления характеристик, требуемых заказчиком, с технологическими возможностями предприятия-исполнителя. Объем *структурных и процессных* изменений зависит от числа мероприятий для адаптации этих систем к уже измененной технологической подсистеме. Предлагаемая методика оценки требуемого объема изменений при заблаговременной подготовке к выпуску новой техники (в том числе и техники нового поколения) представлена в виде следующего алгоритма (последовательности шагов).

Шаг 1. Предприятие как система, состоящая из процессной, структурной и технологической подсистем, представляется в виде

$$(PST) = \begin{pmatrix} p_{11} s_{11} t_{11} & \dots & p_{1n} s_{1n} t_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} s_{m1} t_{m1} & \dots & p_{mn} s_{mn} t_{mn} \end{pmatrix},$$

или в условно-формульном выражении (PST) . Проведя декомпозицию системы предприятия до отдельных подсистем, получим

$$(PST) = (P) \times (S) \times (T), \quad (11)$$

где (P) – исходная процессная подсистема; (S) – исходная структурная подсистема; (T) – исходная технологическая подсистема.

Шаг 2. Технологическая подсистема представляет собой набор взаимоувязанных групп элементов: $\bar{t}_i$ – технология разработки и изготовления КПА i , $i = 1, \dots, n$.

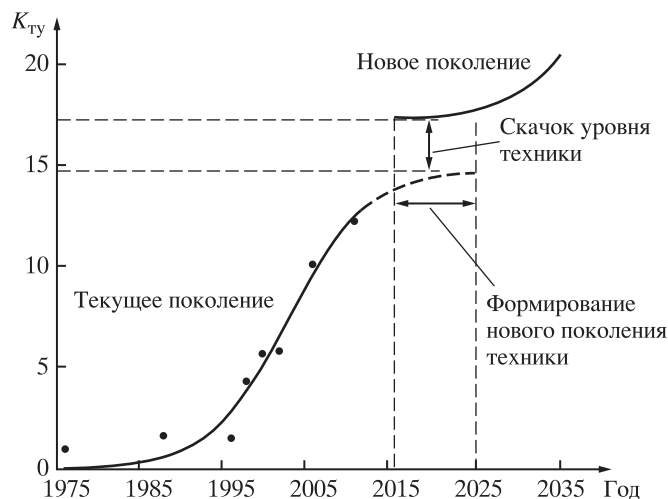


Рис. 2. Динамика интегрального показателя $K_{\text{ту}}$ текущего и следующего поколений КПА на основе системного и экспертного прогнозов развития техники

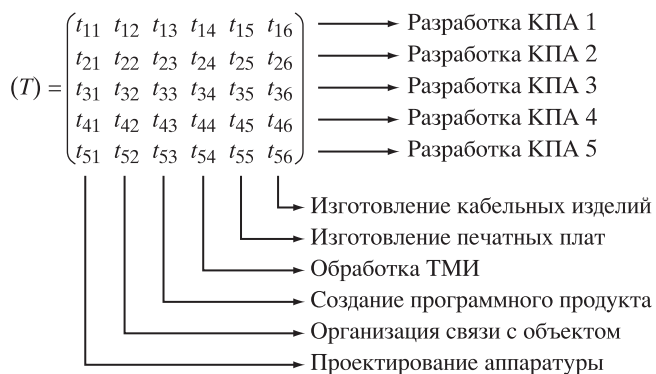


Рис. 3. Матрица совокупности технологий процессов разработки/изготовления КПА

Каждая технология состоит из отдельных локальных технологий. Так, технологию разработки и изготовления КПА 1 можно представить набором отдельных специальных технологий: t_{11} – технология создания программного обеспечения для КПА 1; t_{12} – технология обработки телеметрической информации (ТМИ); t_{13} – технология организации связи с исследуемым объектом; t_{14} – технология изготовления аппаратной части КПА 1; t_{15} – технология изготовления печатных плат для КПА 1; t_{16} – технология проведения испытаний КПА 1.

Каждый элемент t_{ij} матрицы (T) представляет собой характеристику отдельной технологии, используемой при разработке конкретной КПА.

Всю совокупность технологий можно представить в виде матрицы, графически реализованной (для удобства восприятия) на рис. 3.

Каждый вектор-столбец матрицы $\bar{t}_j \in (T)$ представляет набор освоенных технологий в рамках технологического направления j . Так, например, вектор-столбец $\bar{t}_1$ описывает соответственно освоенные системы проектирования аппаратной части РКТ (системы AutoCad, “Компас”, ПО АСКОН и др.). Вектор-столбец $\bar{t}_3$ описывает освоенные на предприятии технологии создания программного обеспечения для разработанных ранее типов РКТ, в том числе следующие системы программирования: t_{13} – Турбо Ассемблер 2.0; t_{23} – Turbo Pascal; t_{33} – Borland Delphi; t_{43} – Microsoft Visual Basic; t_{53} – Quick Basic.

Шаг 3. Формирование совокупности свойств и характеристик технологической подсистемы. При анализе всей такой совокупности свойств и характеристик ее (совокупность) можно оформить в виде некоторой матрицы (R), размером $R_{5 \times 6}$ (5 строк, 6 столбцов), которая определяет (показывает) возможности уже освоенных на предприятии технологий, используемых при разработке КРН. Матрицы (T) и (R) взаимосвязаны. Каждому вектору-столбцу технологической подсистемы $\bar{t}_j$ матрицы (T) в рамках технологического направления j соответствует определенный набор свойств и характеристик, которые составляют соответствующий вектор-столбец $\bar{r}_j$ матрицы (R). Так, вектор-столбец $\bar{r}_1$ матрицы (R) (см. для сравнения ранее рассмотренный столбец $\bar{t}_1$ матрицы (T)) представляет набор характеристик освоенных технологий проектирования аппаратуры, а столбцы $\bar{r}_2, \dots, \bar{r}_6$ матрицы (R), – это соответственно характеристики (см. характеристики столбцов матрицы (T) на рис. 3) освоенных технологий организации связи с объектом, создания программного продукта, обработки телеметрической информации, изготовления печатных плат, изготовления кабельных изделий.

Шаг 4. Внешняя среда предприятия (сюда входят прогнозные характеристики техники нового поколения) формирует совокупность требований к разрабатываемой технике. Учитывая новые требования к разрабатываемой технике, полученные при помощи прогнозного исследования или сформулированные заказчиком, в общем случае формируется матрица требований (X). При разработке техники одного параметрического ряда указанная матрица сводится к вектору-строке требований вида

$$\bar{x}_6 = (x_{61}, x_{62}, x_{63}, x_{64}, x_{65}, x_{66}). \quad (12)$$

Каждый элемент вектора требований будем оценивать отдельно относительно векторов свойств технологической подсистемы

$$\bar{x}_i - \bar{r}_{ij} = \bar{d}_i, \quad (13)$$

где $\bar{x}_i$ – вектор требований внешней среды; $\bar{r}_{ij}$ – вектор имеющихся свойств технологии i ; $\bar{d}_i$ – вектор расхождения внутри каждой технологии.

Вектор $\bar{d}_i$ определяет степень соответствия освоенных технологий требованию внешней среды. Сравнение требований к элементам с возможностями технологической подсистемы предприятия позволяет в общем случае сформировать матрицу расхождений D , а в нашем случае – вектор-строку расхождений:

$$\bar{d}_i = [(x_{i1} - r_{i1}) \dots (x_{in} - r_{in})] = [d_1 \dots d_n]. \quad (14)$$

Если все $d_i \leq 0$, технология или набор технологий могут оставаться без изменений; если хотя бы один элемент вектора требований превышает освоенные возможности $d_i > 0$ – необходимо создавать новый вектор технологии $\bar{t}_i$ так, чтобы $d_i \leq 0$.

Описанные действия по формированию вектора расхождений имеют объективный характер, так как указанный вектор рассчитывается по фактической и объективной прогнозной информации. Дальнейшие действия, связанные с подготовкой изменений подсистем предприятия, имеют субъективный характер, поэтому необходимо, чтобы этой деятельностью занимались компетентные эксперты. Для этого создается группа, в которую входят сотрудники отдела технико-экономического анализа и цен на НИОКР, владеющие методами и приемами оптимизации издержек, и ведущие специалисты по профилю разработок. Анализируются полученные расхождения между требованиями внешней среды и возможностями предприятия-изготовителя, а затем изучаются и предлагаются способы устранения этих рассогласований путем проведения необходимых изменений во всех трех подсистемах предприятия.

В результате выполнения указанных действий по изменению имеющейся технологической подсистемы формируется новая матрица (T_1) , элементами которой будут *измененные, неизмененные и новые векторы*:

$$T_1 = (\bar{t}'_1, \bar{t}_2, \bar{t}'_3, \bar{t}'_4, \bar{t}_5, \bar{t}'_6). \quad (15)$$

В матрицу технологической подсистемы добавляется новый вектор “Технология разработки КРН-6”, и эта новая матрица (T_1) будет использоваться в качестве исходной в следующем цикле изменений.

Количество элементов $d_i > 0$ в векторе расхождений определяет общее количество необходимых изменений технологической подсистемы $I_{\text{техн}}$.

Шаг 5. Изменение процессной подсистемы предприятия в соответствии с адаптированной технологической подсистемой. Процессная подсистема предприятия включает совокупность освоенных и взаимоувязанных групп процессов и графически отражена на рис. 4 в виде матрицы (с соответствующими комментариями).

Так, группа процессов испытаний $\bar{p}_4$ включает в себя: p_{41} – предварительные испытания КРН (ПИ), p_{42} – межведомственные испытания (МВИ) и p_{43} – государственные испытания (ГИ).

Для полной адаптации процессной подсистемы к технологической в общем случае потребуется количество изменений $I_{\text{проц}}$, которые определяются специалистами предприятия под руководством главного технолога.

Шаг 6. Изменение структурной подсистемы предприятия в соответствии с требованиями вектора расхождений технологической подсистемы. Исходная структурная подсистема разрабатывающего предприятия графически представлена на рис. 5.

Нулевые элементы матрицы означают отсутствие соответствующей структурной единицы этого направления. Каждому элементу матрицы соответствует вектор, описывающий этот элемент качественно и количественно.

Так, элемент s_{11} может означать отдел математической обработки информации, которому соответствует свой вектор состава

$$(P) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & 0 \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & 0 & 0 & 0 \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & 0 & 0 \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow \text{Процессы прогнозирования} \\ \longrightarrow \text{Процессы проектирования} \\ \longrightarrow \text{Производственные процессы} \\ \longrightarrow \text{Испытательные процессы} \\ \longrightarrow \text{Процессы обеспечения качества} \\ \longrightarrow \text{Логистические процессы} \end{matrix}$$

Рис. 4. Изменение процессной подсистемы предприятия

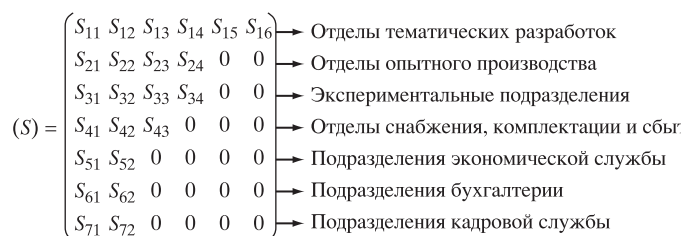


Рис. 5. Изменение структурной подсистемы предприятия

ва $KC_{11} = (m_1 \dots m_6)$ Каждый элемент адаптированной технологической подсистемы исследуется на наличие в имеющейся структурной подсистеме требуемых соответствующих структурных элементов. Отсутствие необходимого элемента означает необходимость качественного и количественного изменения структуры. Общее число структурных изменений – $I_{\text{стр}}$.

В нашем случае общее число комплексных изменений, которые необходимо провести на разрабатываемом предприятии в рамках заблаговременной подготовки к выпуску перспективной КРН, рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{техн}} + I_{\text{проц}} + I_{\text{стр}}. \quad (16)$$

Каждое изменение представляет собой определенный набор изменений, содержание которых определяется логикой самого изменения. Главное в этой деятельности – правильно определить направление изменений и оценить требуемый объем их ресурсного обеспечения. Оценка объема финансирования для проведения необходимых изменений производится путем суммирования стоимостей преобразований технологической, процессной и структурной подсистем:

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{техн}} + S_{\text{проц}} + S_{\text{стр}}. \quad (17)$$

При подготовке предприятия к выпуску новой техники, при НИОКР рост издержек, как показывает опыт, неизбежен. Предложенный механизм проведения начальных этапов определения объема необходимых изменений обеспечивает минимизацию издержек, так как позволяет четко определить, что необходимо изменить и в каком виде, а что можно оставить без изменений при разработке техники требуемого технического уровня.

После определения числа необходимых изменений производится их конкретизация, формируется таблица, в которой отражаются перечень необходимых изменений и их стоимость.

Общее число необходимых изменений будем определять по следующей формуле:

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{техн}} + I_{\text{проц}} + I_{\text{стр}}. \quad (18)$$

Разработанный инструментарий наращивания конкурентных преимуществ при проведении организационных изменений на разрабатывающих предприятиях КРН обеспечит повышение эффективности их функционирования. Рассчитаем объем необходимых изменений при проведении подготовки разрабатывающего предприятия к разработке новой техники, а именно – системы измерения уровня заправки топлива. Всю совокупность свойств технологической подсистемы исследуемого предприятия сформируем в виде матрицы (R_2) из наилучших достигнутых характеристик техники, разработанной за период с 1975 по 2011 г. (с учетом данных табл. 1):

$$(R_2) = \begin{pmatrix} 4 & 62 & 6 & 0,4 & 0,95 & 0,03 \\ 6 & 128 & 6 & 0,4 & 0,95 & 0,05 \\ 8 & 136 & 36 & 0,9 & 0,98 & 1 \\ 16 & 256 & 32 & 0,95 & 0,999 & 2 \\ 19 & 256 & 42 & 0,95 & 0,999 & 4 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Вектор-столбец $\bar{r}_1$ означает, что на предприятии освоена разработка КРН с возможностью контроля числа типов проверяемых параметров от 4 до 19. Вектор-столбец $\bar{r}_2$ означает число проверяемых параметров КРН; $\bar{r}_3$ – число каналов управления; $\bar{r}_4$ – максимальную точность измерений; $\bar{r}_5$ – вероятность безотказной работы; $\bar{r}_6$ – объем зарегистрированной информации.

Актуальность разработки системы измерения уровня заправки (СИУЗ) и открывающиеся новые возможности стали основанием для принятия решения руководством предприятия выполнить начальные этапы НИОКР по разработке СИУЗ для ракет-носителей нового поколения.

С учетом роста $K_{\text{ту}}$ в 1,4 раза КРН нового поколения требования внешней среды можно представить в виде матрицы требований, которая в нашем случае сводится к вектору-строке требований: $\bar{x}_6 = (27 \ 256 \ 58 \ 0,96 \ 0,999 \ 6)$. Тогда вектор расхождений примет вид

$$\begin{aligned} \bar{d} &= [(27-19) \ (256-256) \ (58-42) \ (0,96-0,95) \ (0,999-0,999) \ (6-4)] = \\ &= [d_1 = 8; \ d_2 = 0; \ d_3 = 16; \ d_4 = 0,01; \ d_5 = 0; \ d_6 = 2]. \end{aligned}$$

Из вектора рассогласований видно, что $d_1, d_3, d_4, d_6 > 0$; это свидетельствует о необходимости осваивать новые технологии.

В рассматриваемом примере выявлены следующие расхождения:

– $d_1 = 8$ – анализ освоенных технологий программирования (столбец 1 матрицы свойств технологической подсистемы) показал, что среди них нет технологии, обеспечивающей такой прирост типов проверяемых параметров, поэтому необходимо изменить технологию программирования на более совершенную, например, на C++;

– $d_3 = 16$ – обеспечить устранение данного рассогласования по числу каналов управления проектируемой РКТ можно путем изменения технологии проектирования на САПР Pro/Engineer;

– $d_4 = 0,01$ – повышение точности измерений на 10% требует смены технологии изготовления ячеек устройств;

– $d_6 = 2$ – указанное рассогласование будет устранено путем изменения технологии формирования регистрируемой информации;

– $d_2 = 0$ и $d_5 = 0$ свидетельствуют о том, что имеющиеся на предприятии технологии обеспечивают выполнение требования внешней среды по числу проверяемых параметров и вероятности безотказной работы.

Число измененных технологий соответствует объему необходимых изменений $\Delta T_1 = (1; 0; 1; 1; 0; 1)$, что свидетельствует о необходимости изменения четырех технологий ($I_{\text{техн}} = 4$).

Изменение технологической подсистемы свелось к изменению четырех отдельных специальных технологий, что означает необходимость разработки четырех новых процессов. Для обеспечения качества изготовления КРН потребуется еще два дополнительных процесса обеспечения качества сборки кабельных изделий, объемного монтажа и паяльных соединений. Таким образом, для адаптации процессной подсистемы потребуется шесть изменений ($I_{\text{проц}} = 6$).

Анализ технологических изменений показал, что требуются структурные изменения элемента s_{11} структурной подсистемы предприятия. Элемент s_{11} обозначает отдел математической обработки ТМИ, ему соответствует вектор состава $KC_{11} = (10; 6; 8; 15; 0; 7)$, где 7 – число ведущих инженеров-программистов, 0 – главных специалистов, 15, 8, 6 – соответственно программистов I, II и III категорий, 10 – инженеров-программистов.

Анализ изменений технологической подсистемы потребует трех изменений структурной подсистемы ($I_{\text{стр}} = 3$):

– количественных и качественных изменений состава отдела математической обработки ТМИ, связанных с изменением среды программирования на C++. Потребуется переподготовка двух инженеров-программистов II категории и прием на работу двух инженеров-программистов I категории, владеющих C++. При этом вектор состава элемента s_{11} примет вид $KC_{11} = (10; 6; 8; 17; 0; 7)$;

– количественных и качественных изменений конструкторского отдела (элемент s_{12}) в связи с переходом на программирование в среде Pro/Engineer. Потребуется переподготовка двух специалистов (высокой и средней квалификации);

– техническое обучение шести монтажников шестого разряда отдела опытного производства (элемент s_{21}) работе с новыми паяльными станциями МВТ 201, МВТ-205. Обучение проводится на курсах, организованных отделом технического обучения предприятия, формируется учебная группа, оформляются необходимые договоры с преподавателями, проводится обучение, качество которого контролируется.

Таблица 5. Анализ стоимости необходимых изменений в «ГНПРКЦ “ЦСКБ Прогресс”» для подготовки предприятия к разработке перспективной РКТ (СИУЗ для РН “Русь-М” для космодрома “Восточный”)

Изменения	Стоимость, тыс. руб.
Начальные этапы НИОКР	
1. Технико-экономическое обоснование подготовки предприятия к перспективной СИУЗ:	500
– оценка и анализ требований РКТ для космодрома “Восточный”;	50
– прогнозирование и анализ вариантов удовлетворения требований;	150
– разработка технических предложений по СИУЗ для РН “Русь-М”;	150
– разработка предложений по технологической, процессной и структурной подсистемам	150
Технологическая подсистема	
2. Внедрение системы программирования Borland C++.	40
3. Внедрение разработки РН в среде системы САПР Pro/Engineer на всех этапах конструкторско-технологической подготовки производства.	60
4. Приобретение лицензий:	
– для проектирования в среде систем Windchill и САПР Pro/Engineer на всех этапах конструкторско-технологической подготовки;	350
– для инженерных расчетов программных продуктов MSC.Master Key, ANSYS, FLUENT и ANSYS CFX.	200
5. Обновление компьютерной базы для моделирования процессов в СИУЗ.	150
6. Оснащение предприятия новой экспериментальной базой. Изготовление макетов для отработки принятых технических решений:	100
– стенд имитации заправки бака жидким азотом;	530
– специализированное технологическое оборудование – точечные дискретные датчики;	300
– макет бортового измерения уровня топлива.	150
7. Приобретение паяльных станций MBT–201 и MBT–205 (6 штук)*	200
Процессная подсистема	
8. Разработка новых технологических процессов:	290
– контроль функционирования и регулировка отдельных модулей;	40
– изготовление печатных плат;	50
– изготовление кабельных изделий;	140
– изготовление электронного модуля первого уровня	60
Структурная подсистема	
9. Формирование команды изменений. Привлечение внешних консультантов и обучение.	120
10. Создание бюро прогнозирования (два человека). Обучение методикам прогнозирования и формирования статистических данных по характеристикам разрабатываемой техники.	100
11. Повышение квалификации инженереров-программистов (два человека) с целью обучения работе в среде систем Windchill и САПР Pro/Engineer и ведению расчетов в MSC. Master Key, ANSYS, FLUENT и ANSYS CFX.	90
12. Подготовка монтажников пятого-шестого разрядов на курсах с последующей стажировкой	120
Итого	2500

* Число паяльных станций определяется предполагаемым объемом работ и количеством монтажников, которые будут задействованы в изготовлении печатных плат.

Общее количество изменений, которые необходимо провести на разрабатываемом предприятии в рамках заблаговременной подготовки к выпуску перспективной на 2015 г. РКТ, вычисляется следующим образом:

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{техн}} + I_{\text{проц}} + I_{\text{стр}} = 4 + 6 + 3 = 13.$$

Конкретизируем эти изменения, приведем их содержание и стоимость. Данные расчетов для удобства восприятия сведены в табл. 5.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗА

Укажем на некоторые реальные проекты по смене поколений КРН (данные взяты с официальных сайтов Роскосмоса (Россия), НАСА (США), ЕКА (Европа)), временные сроки которых служат подтверждением сделанных в работе прогнозов.

1. Роскосмосом в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. сделан заказ на разработку эскизного проекта (ЭП) новой “многоразовой ракетно-космической системы первого этапа” (МРКС-1), возможность выполнять который определит тендер. На эту работу выделяется 250 млн руб. и отводится два года на создание ЭП этого нового типа транспорта.

2. Создается концепт-модель нового возвращаемого пилотируемого корабля “Русь”. Его техническое проектирование сейчас ведет РКК “Энергия”. Пилотируемый корабль “Русь” в перспективе должен стать заменой “Союзам”. Эскизный проект “Руси” уже начали готовить. Планируется, что запускаться космические корабли будут ракетами-носителями “Русь”, которые сейчас проектируются самарским предприятием “ЦСКБ Прогресс”.

3. Роскосмос планирует разработать новый опытный образец ядерной электродвигательной установки для межпланетных полетов через четыре года – к 2017 г.

4. Создается новая сверхтяжелая ракета-носитель, при помощи которой будут осуществляться полеты на Луну. На проект потребуется около 15 лет. Такие ракеты сегодня разрабатываются на базе задела, который получен по ракете-носителю “Ангара-5”, – это “Амур” и “Енисей”. Где-то к 2028 г. они должны быть готовы, чтобы осуществлять запуски тяжелых объектов, в том числе для полетов на Луну.

5. В России завершено эскизное проектирование космического транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса, работа по проекту ведется по плану. К 2020 г. в России может появиться космический транспортный комплекс нового поколения, который обеспечит транспортные операции как в околоземном, так и в межпланетном пространстве.

6. Началась подготовка к пуску ракеты-носителя нового поколения “Ангара 1,2 ПП”. Ракета проектируется в четырех классах: грузоподъемностью от легкого (1,5 т) до тяжелого (35 т).

7. Со стартовой площадки на о. Уоллопс (Вирджиния, США) компания Orbital Sciences Corp. (OSC) успешно осуществила первый испытательный запуск новой ракеты-носителя “Антарес” (Antares). В ходе запуска на орбиту был выведен макет грузового корабля “Сигнус” (Sygnus, “Созвездие Лебедя”) массой 3,8 т, а также четыре экспериментальных микроспутника класса Cubesat.

8. НАСА США опубликовало подробности конструкции новой тяжелой ракеты-носителя, которая будет использоваться при пилотируемых полетах к астероидам и Марсу. “Система космических пусков” (Space Launch System – SLS) – так называется в настоящее время этот проект – является самой мощной в своем роде. НАСА сообщило, что первый старт ракеты планируется на конец 2017 г. По предварительным оценкам, стоимость проекта к этому этапу составит 18 млрд долл.

9. Китай разрабатывает три новых поколения ракет-носителей. В частности, сообщают составители документа, в ближайшие пять лет будут использоваться ракеты-носители “Великий поход” (Changzheng) 5–7-го поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анискин Ю.П. (2002). Организация и управление малым бизнесом. М.: Финансы и статистика.
- Журавин Ю. (2012). Ariane для азиатских операторов // *Новости космонавтики*. Т. 22. № 7 (354).
- Львов Д.С., Медницкий В.Г., Медницкий Ю.В., Овсиенко Ю.Н. (1996). Об оценке эффективности функционирования крупномасштабных хозяйственных объектов // *Экономика и математические методы*. Т. 32. № 1.

Макаров Ю.Н. (2011). Российская космонавтика на мировом рынке: конкуренция, проблемы, перспективы // *Экономика и математические методы*. Т. 47. № 3.

Миронов В.В. (2010). Сильно полиномиальный алгоритм решения общей задачи наименьших модулей (в двух частях) // *Сибирский журнал вычислительной математики* (СО РАН). Т. 13. № 2.

Foster R. (1986). *Innovation. The Attacker's Advantage*. N.Y.: Summit Books. Mc Kinsey & Co., Inc.

Поступила в редакцию
19.12.2013 г.

Economic-Mathematical Analysis of the Transitional Stage of Development of the Space Launch Vehicles

V.V. Mironov, M.Yu. Novikova

The economic-mathematical analysis generations of the space launch vehicles (SLV) developments is submitted on the example of Federal State Unitary Enterprise "CSKB Progress" and the adjacent enterprises of space branch. The mathematical model of SLV evolution is created on the large statistical database and corresponds to the laws of large systems development. The time forecast of current SLV generations change is carried on the basis of model in view of expert estimations. There is the conformity of this forecast to modern practice of space branch analyzed.

Keywords: economy, mathematical methods, space launch vehicles, forecast of development.

JEL Classification: C02, C69.