

Научная статья

УДК 90.03.03, 90.03.37, 389.63:378.14

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-15-21>

Метод расчёта стоимости перспективной измерительной техники

Алексей Анатольевич Волчков¹, Алексей Сергеевич Корнев²,
Рустам Зиннатуллин³✉

^{1, 2} Главный научный метрологический центр Минобороны России, г. Мытищи, Московская обл., Россия

¹volkalex@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0887-7782>

²lexxkorban@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2445-6323>

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, zrkzrk@list.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0002-1214-5069>

Аннотация. Исследована проблема повышения качества прогнозов стоимости измерительной техники. Описаны основные методы и модели прогнозирования стоимости измерительной техники, а также основные факторы, определяющие стоимость. Разработан метод расчёта стоимости перспективной измерительной техники, позволяющий учитывать её технические характеристики. Представлены методики расчёта нелинейной зависимости стоимости измерительной техники от технических характеристик. В качестве примера рассмотрены аддитивные и мультипликативные модели стоимости генераторов сигналов и анализаторов спектра как функции технических характеристик этих приборов.

Ключевые слова: измерительная техника, стоимость, прогнозирование, метод аналога, экспертный метод

Для цитирования: Волчков А. А., Корнев А. С., Хайруллин Р. З. Методика прогнозирования стоимости перспективной измерительной техники // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 15–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-15-21>

Method for calculating the cost of perspective measuring equipment

Alexey A. Volchkov¹, Alexey S. Kornev², Rustam Z. Khayrullin³✉

^{1, 2} Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Moscow Region, Russia

¹volkalex@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0887-7782>

²lexxkorban@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2445-6323>

³ Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia, zrkzrk@list.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0002-1214-5069>

Abstract. The problem of improving the quality of forecasts of the cost of measuring means is considered. The main approaches to the prediction value and the main factors that determine the cost of measuring instruments are presented. The method for calculating the cost of perspective measuring equipment based on taking into account its technical characteristics has been developed. The methods for accounting non-linear dependences of cost on technical characteristics are suggested. As example we consider additive and multiplicative value models of generators of high-frequency signals, and spectrum analyzers as the functions of technical characteristics of these devices.

Keywords: measuring equipment, cost, forecast, analog method, expert method

Введение. Измерительная техника (ИТ) является ключевым фактором ускорения научно-технического прогресса. Уровень развития ИТ в значительной степени определяется достижениями в области физики, химии, электроники, а также уровнем развития современных и перспективных технологий [1–4]. Разработка перспективных образцов ИТ с улучшенными техническими характеристиками возможна лишь при использовании новейших научных разработок и технологий проектирования и производства.

Влияние технических характеристик на стоимость ИТ носит в общем случае нелинейный характер. Нелинейность

этой зависимости связана с тем, что приближение технических характеристик к предельным значениям возможно лишь при значительном увеличении производственных и трудовых затрат. Указанное обстоятельство приводит к существенному повышению стоимости ИТ. Предельные значения технических характеристик определяются либо уровнем научно-технологического развития производства, либо физической невозможностью достижения таких предельных значений. По мнению авторов настоящей статьи, при приближении значений технических характеристик к уровням, близким к технологически достижимым, стоимость

ИТ существенно увеличивается, а при приближении к уровням, близким к физически возможным, – стремится к бесконечности.

Разработка и реализация программ долгосрочного и среднесрочного развития парка ИТ происходит, как правило, при ограниченном объёме финансирования [5]. Поэтому совершенствование методологии технико-экономического анализа [6–12] в части разработки и использования методов оценки стоимости ИТ с учётом их технических характеристик представляет важную научно-техническую задачу.

Цель настоящей работы – разработка метода расчёта стоимости перспективной ИТ, позволяющий учитывать её технические характеристики.

Основные модели и методы, используемые при прогнозировании стоимости. Все модели и методы прогнозирования стоимости ИТ можно условно разделить на две группы: формализованные (включающие статистические методы и методы сравнения с аналогом) и экспертные [7]. В настоящей работе предлагается метод оценки стоимости ИТ, в основе которого лежит статистическая (линейная регрессионная) модель [13–15], дополненная следующими методиками:

учёта характеристических корректирующих функций [8];

нелинейной коррекции стоимости (с применением дробно-линейных и экспоненциальных функций), необходимой для прогнозирования стоимости перспективных образцов ИТ с высокими техническими характеристиками в случае, когда для перспективного образца ИТ одна характеристика приближается к предельно возможному значению;

коррекции с помощью плоскостей (гиперплоскостей) в случае, когда для перспективного образца ИТ одновременно две (и более) технические характеристики приближаются к технологически возможным значениям.

Стоимость серийного производства технических систем, в том числе и ИТ, характеризуется как внутрисистемными параметрами (техническими характеристиками, конструктивными особенностями, надёжностью, уровнем унификации [9, 10]), так и внешнесистемными параметрами (производственными технологиями, уровнем межпроектной унификации, микро- и макроэкономическими условиями, выраженными в региональных поправочных коэффициентах, дефляторах, коэффициентах нормативной прибыли предприятия, показателях объёма серии или поправках на осваиваемое производство и т. п.). Основными внешнесистемными параметрами являются техническая оснащённость предприятия, принятые нормативы ценообразования на продукцию (нормативная прибыль, налог на добавленную стоимость, уровень накладных расходов, уровень инфляции), использование импортных материалов и комплектующих. Примем, что стоимость S ИТ

$$C = C(x_1, x_2, \dots, x_n, z_1, z_2, \dots, z_m),$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ и $z_1, z_2, \dots, z_m$ – внутрисистемные и внешнесистемные параметры соответственно.

Будем исследовать влияние внутрисистемных параметров $x_1, x_2, \dots, x_n$ на стоимость ИТ.

Статистические методы и модели. Аддитивная модель. Рассмотрим традиционную линейную регрессию стоимости C , которая является результирующим признаком, а внутрисистемные параметры x_i представляют собой факторные признаки или факторы [13–16]:

$$C = \sum_{i=1}^n b_i x_i + b_0,$$

где b_i – коэффициенты уравнения регрессии.

Алгоритм построения и исследования аддитивной модели описан в работе [13] и включает следующие этапы: построение стандартного уравнения регрессии; расчёт коэффициентов эластичности; построение стандартизованного уравнения регрессии; нахождение коэффициентов парной, частной и множественной корреляций; нахождение скорректированного коэффициента множественной детерминации; оценка по F -критерию Фишера статистической надёжности уравнения регрессии и коэффициента детерминации; составление уравнения множественной линейной регрессии, содержащего только значимые коэффициенты (значимые факторные признаки); проверка выполнения предпосылок метода наименьших квадратов (МНК); нахождение средней погрешности аппроксимации – среднего значения модулей невязок. Отметим, что статистическая аддитивная модель может быть эффективно исследована, например с помощью встроенной в Excel стандартной надстройки «Анализ данных».

Мультипликативная модель. Поскольку влияние технических характеристик на стоимость ИТ в общем случае носит нелинейный характер, рассмотрим нелинейную множественную регрессию [8–10, 14–16]:

$$C = E \prod_{i=1}^n x_i^{b_i^x} \prod_{j=1}^m z_j^{b_j^z}, \quad (1)$$

где E – коэффициент масштаба; $x_i^{b_i^x}$ – i -я ТХ; $z_j^{b_j^z}$ – j -е условие производства ИТ; b_i^x, b_j^z – коэффициенты регрессии, отражающие веса соответственно i -й характеристики и j -го условия производства.

Входящие в уравнение регрессии (1) коэффициенты определяются с помощью МНК, как и в случае аддитивной модели, однако для использования МНК предварительно необходимо перейти от нелинейной к линейной зависимости путём логарифмирования:

$$\ln C = \ln E + \sum_{i=1}^n b_i^x \ln x_i.$$

Алгоритм исследования мультипликативной модели аналогичен алгоритму исследования аддитивной модели [13–16].

Метод сравнения с аналогом. Модели прогнозирования стоимости с использованием метода аналогии [7] в общем случае для аддитивной [15, 16] и мультипликативной [11, 12] моделей имеют вид соответственно

$$C = C^a + \sum_{i=1}^n b_i^x (x_i - x_i^a) + \sum_{j=1}^m b_j^z (z_j - z_j^a);$$

$$C = C^a \prod_{i=1}^n (x_i / x_i^a)^{b_i^x} \prod_{j=1}^m K_j^{b_j^z} (z_j, z_j^a),$$

где n, m – общее число рассматриваемых внутрисистемных и внешнесистемных параметров соответственно; $\prod_{j=1}^m K_j^{b_j^z} (z_j, z_j^a)$ – функция или коэффициент, учитывающий различия условий производства ИТ и её аналога.

Здесь и далее индекс «а» обозначает характеристики аналога ИТ.

Методики учёта нелинейности модели при прогнозировании стоимости перспективных образцов ИТ. Использование корректирующих характеристических функций. Вместо отношений технических характеристик закупаемого образца ИТ и его аналога при прогнозировании стоимости предлагается для каждой характеристики использовать отношение некоторых функций

$$C = C^a \prod_{i=1}^n \left(\frac{f^i(x_i)}{f^i(x_i^a)} \right)^{b_i^x} \prod_{j=1}^m K_j^{b_j^z} (z_j, z_j^a),$$

где $f^i(x_i), f^i(x_i^a)$ – функции, определяющие характер влияния на стоимость i -й характеристики образца ИТ и его аналога.

На основе качественного анализа стоимостных данных и технических характеристик ИТ, а также работ по сравнительному анализу технического уровня радиоэлектронной аппаратуры [8–10] предложены корректирующие функции f_k для следующих технических характеристик ИТ:

$f_k = B^{-1}$ для производительности (времени измерения, анализа и пересылки данных), где B – скорость измерений;

$f_k = \sqrt{N}$ для универсальности, где N – количество одновременно оцениваемых характеристик сигналов или количества классов формируемых сигналов;

$f_k = \sqrt{n}$ для функциональности (количества функциональных подсистем измерительного комплекса), где n – количество выполняемых функций;

$f_k = \ln(1-Q)$ для точности измерений, где Q – вероятность измерения с заданным пределом допустимой погрешности;

$f_k = L^2$ для дальности измерения, где L – расстояние от ИТ до объекта измерения;

$f_k = \ln(1-\eta)$ для надёжности, где η – вероятность безотказной работы;

$f_k = \sqrt{m}$ для чувствительности, где m – чувствительность приёмника;

$f_k = \sqrt{w}$ для мощности, где w – мощность излучения;

$f_k = \Delta F = F_{\max} - F_{\min}$ для частотного диапазона с верхней $F_{\max}$ и нижней $F_{\min}$ границами.

Применение дробно-линейных функций. Рассмотрим два случая разработки образца ИТ.

Первый случай. Уровень одной из технических характеристик образца ИТ, обозначенной x_1 , приближается к уровню, близкому к физически возможному. Характерной особенностью данного случая является стремление к бесконечности стоимости образца ИТ при приближении указанной технической характеристики к физически нереализуемому уровню. По остальным техническим характеристикам $x_2, x_3, \dots, x_n$

зависимость стоимости C от соответствующей характеристики будет линейной ($b_0^S(x_2, x_3, \dots, x_n)$ – линейная функция своих аргументов). Стоимость ИТ вычисляется по формуле

$$C = \begin{cases} b_1 x_1 + b_0^S & \text{при } x_{10} \leq x_1 \leq x_{11}; \\ \frac{b_1(x_{13} - x_{11})(x_1 - x_{11})}{(x_{13} - x_{11})} + b_1 x_{11} + b_0^S & \text{при } x_{11} < x_1 < x_{13}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь и далее нижний индекс в виде двузначного числа означает, что соответствующее значение технической характеристики задано, причём первое число означает порядковый номер технической характеристики, а второе – её конкретное значение; $x_{10} \leq x_1 \leq x_{11}$ – участок линейности функции стоимости $C = C(x_1)$; $x_{11} < x_1 < x_{13}$ – участок нелинейности (резкого роста и стремления к бесконечности при $x_1 \rightarrow x_{13}$). На рис. 1 представлен характерный вид нелинейной зависимости стоимости ИТ C от одной технической характеристики x_1 (по осям отложены нормированные значения).

Второй случай. Уровень той же технической характеристики образца ИТ приближается к уровню, близкому к предельному технологически достижимому. В этом случае стоимости ИТ увеличивается до достаточно больших, но все же конечных значений (см. рис. 1, кривая 2, где $x_{10} \leq x_1 \leq x_{11}$ – участок линейности функции; $x_{11} < x_1 < x_{12}$ – участок нелинейного роста стоимости до достаточно большого значения $C(x_{12})$).

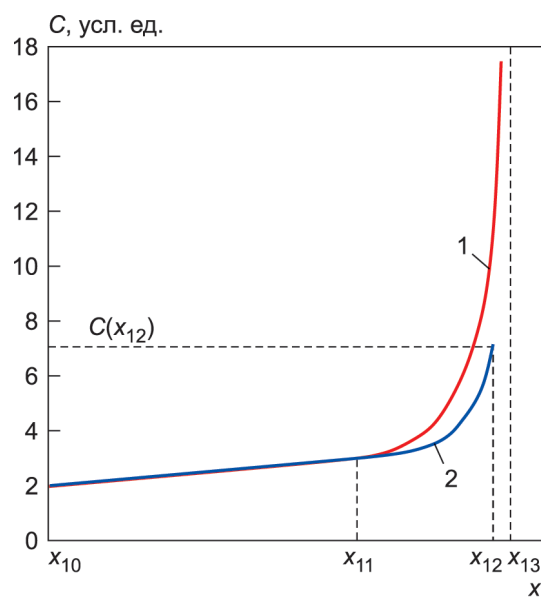


Рис. 1. Характерный вид нелинейности при прогнозировании стоимости C измерительной техники в случаях приближения её технической характеристики x_1 к физически невозможному уровню x_{13} (1) и к технологически предельно возможному уровню x_{12} (2)

Fig. 1. A typical type of nonlinearity when predicting the cost in the following cases:

1 – approaching technical specification to a physically impossible level at $x_1 \rightarrow x_{13}$; 2 – approximation of technical specification to the technologically maximum possible level at $x_1 \rightarrow x_{12}$

Использование экспоненциальных функций. Пусть разрабатывается образец ИТ с одной из технических характеристик (например, x_1), уровень которой приближается к уровню, близкому к предельному технологически достижимому. Зависимости стоимости ИТ от остальных технических характеристик предполагаются линейными ($b_0^S(x_2, x_3, \dots, x_n)$ – линейная функция своих аргументов). Тогда стоимость ИТ вычисляется по формуле

$$C = \begin{cases} b_1 x_1 + b_0^S & \text{при } x_{10} \leq x_1 \leq x_{11}; \\ b_1 x_{11} + b_0^S - \frac{b_1}{\alpha} + \frac{b_1}{\alpha} \exp(\alpha(x_1 - x_{11})) & \text{при } x_1 > x_{11}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $x_{10} \leq x_1 \leq x_{11}$ – участок линейности функции; $x_1 > x_{11}$ – участок экспоненциального роста и стремления к бесконечности; α – степень роста функции стоимости ИТ, характеризующая скорость увеличения стоимости с увеличением значения соответствующей технической характеристики при $x_1 > x_{11}$; b_1 – коэффициент, равный тангенсу угла наклона касательной к экспоненциальной функции в точке $x_1 = x_{11}$ и обеспечивающий гладкость функции стоимости в окрестности точки сопряжения линейного и экспоненциального участков.

Отметим, что для учёта нелинейности модели целесообразно применять экспоненциальные функции, если существуют предварительные оценки (возможно статистические или экспертные) степени роста затрат по мере увеличения значения технической характеристики. Дробно-линейные функции целесообразно использовать, если имеются предварительные оценки предельного значения технической характеристики, которого невозможно достичь в силу законов физики.

Характеристики анализаторов спектра

АС	С, руб.	$D_{\max}$, Гц	$D_{\min}$, ГГц	N , дБм	N_F , дБн/Гц	M , дБ	A
N10	1236540	9000	7,0	162	105	0,3	+++++
N20	1317672	20	3,6	166	114	0,3	+++++
N38	1325400	20	8,4	167	106	0,75	+++++
N96	592970	10^5	6,0	156	80	0,5	++++
N00A	620350	9000	7,5	157	88	0,5	++++
N20A	282800	9000	3,0	148	88	2,0	++
N40A	375672	10^5	3,0	144	87	1,5	++
N42C	497134	100	7,0	152	86	0,6	+++
N43C	577079	10^6	13,6	152	86	0,6	+++
N40B	329307	10^5	3,0	124	87	1,5	+
E08B	712711	9000	26,5	130	94	1,1	+++
D815	58750	9000	1,5	135	80	1,5	+
D8151	67550	9000	1,5	135	80	1,5	+
D1020	156000	9000	2,0	120	80	1,5	++
D1030	195000	9000	3,0	138	80	0,4	++
D10301	242000	9000	3,0	148	88	0,4	+++
D10302	242000	9000	3,0	148	88	0,4	+++
GA43	202285	9000	3,0	148	95	1,0	+++
GA431	224814	9000	3,0	148	95	1,0	+++
RSA103	1298448	1	3,0	154	113	0,5	+++++
GSP830	189329	9000	3,0	152	75	1,5	++
GSP930	218304	9000	3,0	139	113	1,5	++
MS692	1809780	50	26,5	155	113	0,5	+++++

Применение плоскостей и гиперплоскостей. Рассмотрим случай разработки образца ИТ, сразу две технических характеристики (x_1, x_2) которого приближаются к уровням, близким к предельно достижимым. Построим функцию двух переменных, которая задаёт плоскость, проходящую через три заданные (опорные) точки (x_{11}, x_{21}), (x_{12}, x_{21}), (x_{11}, x_{22}):

$$C(x_1, x_2) = z(x_{11}, x_{21}) + \frac{z(x_{12}, x_{21}) - z(x_{11}, x_{21})}{x_{12} - x_{11}}(x_1 - x_{11}) + \frac{z(x_{11}, x_{22}) - z(x_{11}, x_{21})}{x_{22} - x_{21}}(x_2 - x_{21}). \quad (4)$$

Здесь точка с координатами $(x_1, x_2) \in \{[x_{11}, x_{12}] \times [x_{21}, x_{22}]\}$ лежит за пределами области линейности функции стоимости.

Значения функции двух переменных $z(x_1, x_2)$ для моделей учёта нелинейности с помощью дробно-линейных и экспоненциальных функций вычисляется с использованием формул (2), (3) соответственно. При этом зависимости от переменных $x_3, \dots, x_n$ будут линейными.

Если три или более технических характеристики разрабатываемого образца ИТ приближаются к уровню, близкому к технологически (физически) достижимому, уравнение для $C(x_1, x_2, x_3, \dots)$ будет аналогично (4). Геометрически это уравнение будет задавать гиперплоскость соответствующей размерности, проходящую через три и более заданные точки.

Отметим, что для оценки стоимости перспективных образцов ИТ, у которых сразу две или более технических характеристики приближаются к уровням, близким к предельно возможным, можно использовать гармонические функции, удовлетворяющие соответствующим граничным условиям. Пример использования гармонических функций приведен в [13].

Результаты математического моделирования. Результаты исследования регрессионной модели. В работе [13] приведён пример построения и исследования регрессионной модели для расчёта стоимости генераторов сигналов с пятью техническими характеристиками $x_1, x_2, \dots, x_5$. Объём (количество типов генераторов) исследуемой выборки 8. Предполагали, что все генераторы являются продукцией одного и того же предприятия, поэтому их внешнесистемные параметры неизменны и не влияют на стоимость.

Уравнение множественной регрессии для технических характеристик $x_1 - x_5$ имеет вид [13]:

$$C = -88,90 + 0,791x_1 + 0,685x_2 + 0,00000186x_3 - 0,340x_4 + 7,02x_5.$$

Проверка значимости коэффициентов корреляции по критерию Стьюдента показала, что для уровня доверия 95 % значимыми будут не все коэффициенты уравнения регрессии, а только коэффициенты 3–5 (т. е. для технических характеристик $x_3 - x_5$). Поэтому было построено новое уравнение множественной регрессии со значимыми коэффициентами:

$$C = 13,24 + 0,0000136x_3 - 0,158x_4 + 3,22x_5. \quad (5)$$

Уравнение (5) можно применять при оценивании стоимости существующих и современных генераторов в ближайшей перспективе. При совместном использовании уравнения (5) и нелинейной модели (2) или (3) можно прогнозировать стоимость перспективной ИТ. Отметим также, что в [13] представлены некоторые результаты прогнозирования стоимости генератора второго типа с использованием аддитивной регрессионной модели (5), а также результаты моделирования с использованием нелинейной модели (3).

Построение и исследование мультипликативной модели. В качестве исследуемых образцов ИТ рассмотрим анализаторы спектра (АС). Исходные данные – технические характеристики (верхняя $D_{\max}$ и нижняя $D_{\min}$ границы частотного диапазона применения АС, средний уровень собственного шума N , фазовый шум N_F при отстройке частоты 10 кГц, погрешность измерения уровня шума M , уровень A дополнительных функциональных возможностей, а также условная стоимость C АС различных типов) [8] – сведены в таблицу. Уровень A дополнительных функциональных возможностей АС, его конструктивных преимуществ (наличие трекинг-генератора, вид интерфейса, качество монитора, программное обеспечение и т. д.) оценивается в баллах, соответствующих количеству знаков «+».

Отметим, что существенной является верхняя граница частотного диапазона, поскольку его нижняя граница на стоимость АС не влияет.

Выражение для регрессии после потенцирования имеет вид

$$C = 0,59 D_{\max}^{0,44} N^{0,76} N_F^{1,82} M^{-0,06} A^{0,68}.$$

Рассчитанное фактическое значение F -критерия Фишера [13–15] составляет 18,6, что свидетельствует о статистической значимости модели.

Таким образом, стоимость рассчитывается по формуле

$$C = C^a (D_{\max}/D_{\max}^a)^{0,44} (N/N^a)^{0,76} (N_F/N_F^a)^{1,82} \times (M/M^a)^{-0,06} (A/A^a)^{0,68} \prod_{j=1}^m K_j(z_j, z_j^a). \quad (6)$$

Применение корректирующей функции для учёта нелинейности. В качестве примера рассмотрим параметр A (дополнительные функции, комплектации), см. таблицу, причём исходные данные необходимо дополнить значениями $\ln \sqrt{A}$. Расчётные коэффициенты регрессии составили 0,42; 0,605; 1,75; –0,093; 1,42 при $E = 1,82$ (см. формулу (1)).

Согласно регрессионной статистике уменьшается с 0,42 до 0,40 стандартная погрешность и повышается с 18,6 до 19,6 значимость по F -критерию Фишера относительно модели (6). Скорректированное выражение (6) примет вид

$$C = C^a (D_{\max}/D_{\max}^a)^{0,42} (N/N^a)^{0,605} (N_F/N_F^a)^{1,75} \times (M/M^a)^{-0,093} (\sqrt{A}/\sqrt{A^a})^{1,42} \prod_{j=1}^m K_j(z_j, z_j^a).$$

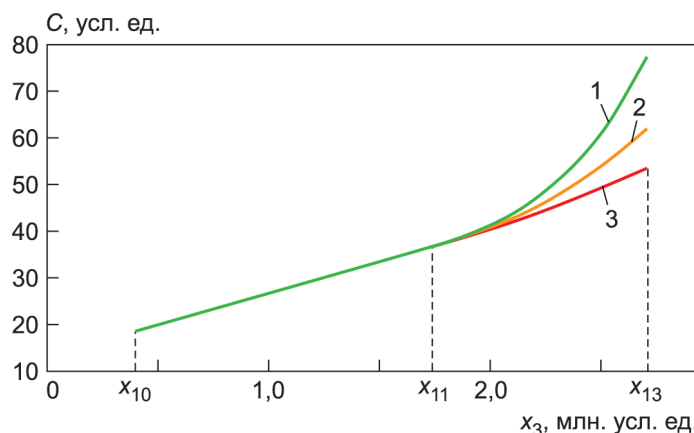


Рис. 2. Характерный вид нелинейности при прогнозировании стоимости ИТ с использованием экспоненциальных функций:

$$1 - \alpha = 21 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}; 2 - \alpha = 13 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}; 3 - \alpha = 5 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}$$

Fig. 2. A typical form of nonlinearity when predicting the cost of measuring equipment based on the use of exponential functions:

$$1 - \alpha = 21 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}; 2 - \alpha = 13 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}; 3 - \alpha = 5 \cdot 10^{-7}, \beta = 14 \cdot 10^{-6}$$

В качестве примера рассчитаем прогнозную стоимость серийного образца АС типа RSA103, за базовый образец-аналог примем АС типа N20A. Внешнесистемные параметры для рассматриваемых образцов предположим равнозначными и вычислим стоимость:

$$C = 282800 \cdot (3/3)^{0,44} (154/148)^{0,76} \times (113/88)^{1,82} (0,5/2)^{-0,06} (6/2)^{0,68} \approx 1047,4 \text{ тыс. руб.}$$

При этом погрешность прогнозирования составляет 19 %.

Отметим, что при учёте нелинейности с применением дробно-линейных функций и проходящих через опорные точки гиперплоскостей точности прогнозирования схожие.

Рассчитаем стоимость анализатора при использовании корректирующей функции:

$$C = 282800 \cdot (3/3)^{0,42} (154/148)^{0,605} (113/88)^{1,75} \times (0,5/2)^{-0,093} (\sqrt{6}/\sqrt{2})^{1,42} \approx 1102,6 \text{ тыс. руб.}$$

При этом погрешность прогнозирования составляет около 15 %, т. е. использование корректирующей функции обеспечивает меньшую погрешность прогнозирования по сравнению с применением обычной мультипликативной регрессионной модели (6).

Учёт нелинейности модели с помощью экспоненциальных функций. Предположим, что разрабатывается перспективный образец ИТ, третья техническая характеристика x_3 которого приближающейся к предельному технологически возможному уровню x_{13} [13]. На рис. 2 приведены зависимости $C(x_3)$ стоимости ИТ от указанной технической

характеристики для трёх разных значений степени α роста экспоненциальной функции (3). Здесь $x_{10}=380000$; $x_{11}=1670000$; $x_{13}=2600000$. Параметр α позволяет выбрать нелинейную прогнозную модель, наиболее адекватную уровню технологического развития приборостроительной отрасли [13].

Обсуждение результатов. Составной частью разработанного в статье метода расчёта стоимости перспективной ИТ являются две группы альтернативных методик учёта нелинейности моделей на основе использования корректирующих функций, а также на основе расширения области определения функций стоимости на области, прилежащие к предельно возможным значениям технических характеристик (с помощью дробно-линейных функций, экспоненциальных функций и гиперплоскостей).

Важным достоинством методик первой группы является возможность учёта характерных участков нелинейности в процессе формирования параметров статистической модели. Недостаток этих методик – некоторая субъективность, поскольку конкретный вид корректирующих функций определяется методами сравнительного анализа и экспертными методами.

Достоинством методик второй группы является возможность учёта прогнозируемого уровня научного и технологического развития производства, а недостатком – «обособленность» от линейной регрессионной модели, в сочетании с которой эти методики используются для оценки стоимости перспективных образцов ИТ. Отметим, что в методики второй группы входят прогнозные значения параметров технологического развития производства, а сами методики не предназначены для прогнозирования развития производства и технологий.

Разработанный авторами настоящей статьи метод расчёта стоимости целесообразно применять отдельно для ИТ каждого типа (подтипа). Попытки применения метода для разнородной группы ИТ показали, что получаемые регрессионные уравнения не обладают статистической надёжностью, а соответствующие модели прогнозирования не являются адекватными.

Заключение. Предложенный метод расчёта стоимости перспективной ИТ в сочетании с методом [13] позволяет в зависимости от конкретной решаемой задачи использовать различные, наиболее подходящие методики и модели учёта нелинейной зависимости стоимости от технических характеристик. Использование методик учёта нелинейности моделей позволяет повысить точность прогнозирования стоимости перспективной ИТ. В рассмотренном примере применение методики расчёта стоимости с использованием корректирующих функций обеспечило более высокую точность прогнозирования стоимости по сравнению с применением методики, основанной на расширении области определения функции стоимости.

Разработанный метод расчёта стоимости ИТ применяется при обосновании целесообразности модернизации существующих образцов и прогнозировании стоимости разработки перспективных образцов, а также при среднесрочном и долгосрочном планировании развития парка ИТ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 18-01-00385А, 18-08-01494А).

Список литературы

1. Панычев С. Н., Бывших Д. М., Суровцев С. В., Самоцвет Н. А. Формализованный подход к генерации рациональных вариантов развития системы испытаний техники радиоэлектронной борьбы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. С. 71–75.
2. Буренок В. М., Стахлич Л. В. Совершенствование испытательного комплекса Министерства обороны Российской Федерации // Военная мысль. 2007. № 12. С. 16–19.
3. Lin T. Y., Cheng C. C., *Precision Engineering*, 2011, vol. 3, pp. 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.02.001>
4. Lavrik E., Frankenfeld U., Mehta S., Panasenko I., Schmidt H., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 935, pp. 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.039>
5. Hang Li, Songgang Xu, John Keyser, *Computer Aided Geometric Design*, 2019, vol. 75, 101788. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2019.101788>
6. Леонов А. В., Пронин А. Ю. Оценка затрат на создание высокотехнологичной продукции // Компетентность. 2015. № 6. С. 32–37. <https://rucont.ru/efd/467181>
7. Льюис К. Д. Методы прогнозирования экономических показателей: Пер. с англ. Е. З. Демиденко. М.: Финансы и статистика, 1986. 318 с.
8. Бывших Д. М., Зеленская С. Г., Суровцев С. В. Прогнозирование стоимости средств измерений // Радиопромышленность. 2018. № 4. С. 76–84. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2018-28-4-76-84>
9. Бывших Д. М., Дмитриев А. В., Жуков А. М. Экономико-математические модели оценки военно-экономической целесообразности создания образцов техники радиоэлектронной борьбы с высокой модернизационной пригодностью // Вооружение и экономика. 2013. № 2. С. 80–90.
10. Батьковский А. М., Леонов А. В., Пронин А. Ю., Фомина А. В. Эффективность мероприятий по унификации и импортозамещению высокотехнологичной продукции // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 132–142.
11. Маричев П. А., Корнев А. С., Хайруллин Р. З. К оптимальному управлению показателями эффективности парка контрольно-измерительной техники // Вестник МГСУ. 2017. № 5 (104). С. 564–571. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.564-571>
12. Арепин Ю. И., Зосиев В. В., Доппа Р. В. Тактические особенности обоснования стоимости жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 123–126.
13. Волчков А. А., Корнев А. С., Хайруллин Р. З. Метод прогнозирования стоимости современной и перспективной измерительной техники // Законодательная и прикладная метрология. 2020. № 6. С. 37–42.
14. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.

15. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. М.: Кнорус, 2013. 448 с.
16. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. М.: Юнити-Дана, 2001. 270 с.

References

1. Panychev S. N., Byvshih D. M., Surovtsev S. V., Samotsvet N. A., *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 71–75 (in Russ.).
2. Burenok V. M., Stakhlich L. V., *Voennaya mysl'*, 2007, no. 12, pp. 16–19 (in Russ.).
3. Lin T. Y., Cheng C. C., *Precision Engineering*, 2011, vol. 3, pp. 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.02.001>
4. Lavrik E., Frankenfeld U., Mehta S., Panasenko I., Schmidt H., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 935, pp. 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.039>
5. Hang Li, Songgang Xu, John Keyser, *Computer Aided Geometric Design*, 2019, vol. 75, article 101788. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2019.101788>
6. Leonov A. V., Pronin A. Yu., *Kompetentnost'*, 2015, no. 6, pp. 32–37 (in Russ.).
7. Lewis K. D., *Industrial and business forecasting methods*, London, Boston, Butterworth Scientific, 1982, 143 p.
8. Byvshih D. M., Zelenskaya S. G., Surovtsev S. V., *Radio-promyshlennost'*, 2018, no. 4, pp. 76–84 (in Russ.). <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2018-28-4-76-84>
9. Byvshih D. M., Dmitriev A. V., Zhukov A. M., *Vooruzhenie i ekonomika*, 2013, no. 2, pp. 80–90 (in Russ.).
10. Batkovsky A. M., Leonov A. V., Pronin A. Yu., Fomina A. V., *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 6, pp. 132–142 (in Russ.).
11. Marichev P. A., Kornev A. S., Khayrullin R. Z., *Vestnik MGSU*, 2017, no. 5 (104), pp. 564–571 (in Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.5.564-571>
12. Arepin Yu. I., Zosiev V. V., Dopira R. V. *Programmnye produkty i sistemy*, 2013, no. 2, pp. 123–126 (in Russ.).
13. Volchikov A. A., Kornev A. S., Khayrullin R. Z., *Legislative and Applied Metrology*, 2020, no. 6, pp. 37–42 (in Russ.).
14. Ventzel E. S., *Issledovanie operacij*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972, 552 p. (in Russ.).
15. Ventzel E. S., Ovcharov L. A., *Teoriya sluchajnyh processov i eyo inzhenernye prilozheniya*, Moscow, Knorus Publ., 2014, 448 p. (in Russ.).
16. Ayvazyan S. A., Mkhitaran V. S., *Prikladnaya statistika v zadachah i uprazhneniyah*, Moscow, Yuniti-Dana Publ., 2001, 275 p. (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.09.2020; принята к публикации 30.10.2020.