

Стохастическая модель динамики частных показателей технических инноваций

Stochastic model of the dynamics of private indicators of technical innovation

УДК 338

Получено: 16.12.2020

Одобрено: 12.01.2021

Опубликовано: 25.02.2021

Анисимов В.Г.

д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Санкт-Петербургского Политехнического университета им. Петра Великого
e-mail: an-33@yandex.ru

Anisimov V.G.

Doctor of Engineering, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, professor at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
e-mail: an-33@yandex.ru

Анисимов Е.Г.

д-р техн. наук, д-р военных наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор, Российского университета дружбы народов,
e-mail: an-33@rambler.ru

Anisimov E.G.

Doctor of Engineering, professor, Doctor of Military Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor, Peoples' Friendship University of Russia,
e-mail: anis.an-33@rambler.ru

Тебекин А.В.

д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор, почетный работник науки и техники Российской Федерации, профессор кафедры менеджмента Московского государственного института международных отношений (Университета) МИД России
e-mail: Tebekin@gmail.com

Tebekin A.V.

Doctor of Engineering, Doctor of Economics, professor, honorary worker of science and technology of the Russian Federation, professor of department of management of the Moscow State Institute of International Relations (University) MFA of Russia
e-mail: Tebekin@gmail.com

Песчанникова Е.Н.

канд. экон. наук, АО «Концерн «Радиотехнические и Информационные Системы», Руководитель направления интеграции информации,
e-mail: epeschanikova@aorti.ru

Peschannikova E.N.

PhD in Economics, "Concern" Radio Engineering and Information Systems ", Head of Information Integration Department,
e-mail: epeschanikova@aorti.ru

Аннотация

Предложена стохастическая модель прогнозирования динамики частных показателей инноваций в технической сфере. В основу модели положено представление инновационного процесса в виде скачкообразного изменения в допустимом диапазоне показателей качества или параметров того или иного технического объекта. При этом полагается, что процесс инновационного изменения каждого из показателей представляет собой последовательность скачков, совершаемых в случайные моменты времени, связанные с появлением очередного нового (модернизированного) варианта рассматриваемого технического объекта. В таком представлении динамика частных показателей технического объекта в ходе его модернизации формализуется в виде сумм случайного числа случайных слагаемых. В статье предложен подход к построению функций плотности распределения таких сумм. Совокупность этих функций для всех частных показателей технического объекта составляет стохастическую модель прогноза его инновационного изменения.

Ключевые слова: технические инновации, частные показатели качества, динамика, прогнозирование, модель.

Abstract

A stochastic model of forecasting the dynamics of private indicators of innovations in the technical sphere is proposed. The model is based on the presentation of the innovation process in the form of an abrupt change in the permissible range of quality indicators or parameters of a particular technical object. It is assumed that the process of innovative change in each of the indicators is a sequence of jumps made at random times associated with the emergence of the next new version of the considered technical object. In this representation, the dynamics of private indicators of a technical object in the course of its modernization is formalized in the form of sums of a random number of random terms. The article proposes an approach to constructing the distribution density functions of such sums. The combination of these functions for all particular indicators of a technical object constitutes a stochastic model for forecasting its innovative change.

Keywords: technical innovations, particular indicators of quality, dynamics, forecasting, model.

1. Введение

Решение современных проблем обеспечения эффективности процессов социально-экономического развития Российской Федерации неразрывно связано с поиском и реализацией конструктивных управленческих решений по расширению и ускорению технологической модернизации отечественных предприятий [35]. Расширение и ускорение процессов технологической модернизации отечественных предприятий неразрывно связано с разработкой и реализацией технических инноваций [1–8, 33]. Их результатом являются те или иные технические объекты. Ожидаемым результатом создания технических инноваций является улучшение показателей качества создаваемой продукции [9–14, 34, 36]. При этом изменение показателей качества создаваемой продукции за счет внедрения технических инноваций может носить либо эволюционный (плавный), либо революционный (скачкообразный) характер [15–21, 37]. Прогнозированию эволюционного изменения показателей инновационного процесса в сфере технических инноваций посвящена статья [22]. Настоящая статья дополняет [22] в части прогнозирования показателей инновационного процесса, динамика которых носит скачкообразный характер. При этом процесс изменения каждого из этих показателей представляет собой последовательность скачков, совершаемых в случайные моменты времени, связанные с появлением очередного нового варианта рассматриваемого технического объекта.

2. Материалы и методы

С математической точки зрения каждый технический объект может быть представлен в виде вектора $X(t)$ его показателей качества:

$$X(t) = \|x_k(t)\|, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1),$$

где $x_k(t)$ – значение k -го показателя качества технического объекта в момент времени t ;

K – общее количество частных показателей, характеризующих рассматриваемый объект.

Инновационное развитие рассматриваемого технического объекта в формализованном представлении заключается в изменении компонент вектора (1) с течением времени [23–25]. Поскольку инновационный процесс в технической сфере связан с появлением новых технологически более совершенных технических объектов, то можно полагать, что изменение компонент вектора (1) носит дискретный (скачкообразный) характер, обусловленный появлением указанных объектов. При этом как величина каждого скачка и их количество n на глубину прогноза (за промежуток времени, на который осуществляется прогноз) являются неопределенными.

Снятие этой неопределенности в случае статистической устойчивости изменения компонент вектора (1) и параметра n обеспечивается их представлением в виде соответствующих случайных величин [26–30]. Тогда задача прогнозирования инновационного развития технического объекта (изменения компонент вектора (1)) сводится к задаче определения функции распределения суммы случайного числа случайных слагаемых.

Особенность инновационного процесса в технической сфере состоит в его инерционности. Она состоит в существенной длительности промежутков времени между появлениями новых образцов того или иного технического объекта. Следовательно, количество скачков компонент вектора (1) на глубину прогноза является случайным, но ограниченным. Это не позволяет применить для решения сформулированной задачи прогнозирования изменения компонент вектора (1) традиционные методы суммирования случайного числа случайных слагаемых, поскольку они либо позволяют определять только моменты функций распределения суммы случайного числа случайных слагаемых [31], либо предполагают неслучайность количества скачков и существование предельных (при $n \rightarrow \infty$) распределений случайных слагаемых.

Учет случайности и ограниченности величины n при решении рассматриваемой задачи прогнозирования инновационного развития технического объекта предполагает применение специфического аналитического аппарата. В его основу может быть положен традиционный для теории вероятностей аппарат характеристических функций. Характеристическая функция $\varphi(r)$ случайной величины Y представляет собой преобразование Фурье-Стилтьеса ее функции $F(y)$ распределения, т.е.:

$$\varphi(r) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{irY} dF(y) \quad (2),$$

где i – мнимая единица;

r – действительное число.

Характеристическая функция (2) обладает свойствами единственности и мультипликативности.

Свойство единственности состоит в том, что если $\varphi(r)$ абсолютно интегрируема на всей числовой оси, а $F(y)$ имеет непрерывную производную $f(y)$ (функцию плотности распределения), то

$$f(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{iry} \varphi(r) dr \quad (3).$$

Соотношение (3) представляет собой формулу обращения и отражает тот факт, что функция плотности распределения случайной величины Y , а, следовательно, и ее функция распределения $F(y)$ однозначно определяются характеристической функцией (2).

Свойство мультипликативности заключается в том, что характеристическая функция случайной величины Y , равной сумме

$$Y = \sum_{n=1}^N Y_n$$

независимых случайных величин Y_n ($n=1,2,\dots,N$), представляет собой произведение характеристических функций слагаемых, т.е.:

$$\varphi(r) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{irY} dF(y) = \prod_{n=1}^N \varphi_n(r) \quad (4),$$

где
$$\varphi_n(r) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{irY_n} dF_n(y) \quad (5);$$

$F_n(y)$ – функция распределения случайной величины Y_n .

Указанные свойства характеристических функций делают их удобным инструментом для построения стохастической модели динамики частных показателей технических инноваций.

3. Результаты

Как показано в п. 2, задача прогнозирования инновационного развития технического объекта (изменения компонент вектора (1)) сводится к задаче определения функций распределения сумм случайного числа случайных слагаемых, отражающих изменения компонент вектора (1) в ходе модернизации рассматриваемого объекта. Для формализации этого процесса введем случайные величины X_{kn} , ($k=1,2,\dots,K$; $n=0,1,2,\dots$), отражающие величины изменения соответствующих компонент вектора (1) в ходе n -й модернизации объекта. Не снижая общности можно полагать, что эти величины являются неотрицательными, т.е.:

$$X_{kn} \geq 0, \quad (k=1,2,\dots,K; \quad n=1,2,\dots) \quad (6).$$

Естественно предположить, что случайные величины X_{kn} , ($k=1,2,\dots,K$; $n=1,2,\dots$) независимы и имеют одинаковые функции распределения $F_k(x)$ и функции $f_k(x)$ плотности, распределения, а, следовательно, одинаковые характеристические функции

$$\varphi_{k0} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{irx} dF_k(x) \quad (7).$$

С учетом принятых обозначений, прогнозное значение каждого k -го ($k=1,2,\dots,K$) показателя рассматриваемого технического объекта после n модернизаций представляется суммой:

$$X_k(n) = X_{k0} + X_{k1} + \dots + X_{kn} \quad (8).$$

Количество n модернизаций рассматриваемого технического объекта на глубину прогноза также является случайной величиной. Вероятность события, состоящего в том, что эта величина примет значение n , обозначим p_n .

Тогда, с учетом свойства мультипликативности, характеристическая функция суммы случайного числа n независимых одинаково распределенных случайных величин X_{kn} определяется соотношением

$$\varphi_k(r) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n \varphi_{k0}^n(r), \quad k=1,2,\dots,K \quad (9).$$

Из (6), с учетом формулы обращения (3), следует

$$f_k(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \sum_{n=0}^{\infty} p_n \varphi_{k0}^n(r) dr, \quad k=1,2,\dots,K \quad (10).$$

Вследствие того, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \sum_{n=0}^{\infty} p_n \varphi_{k0}^n(r) dr \leq \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \sum_{n=0}^{\infty} p_n \varphi_{k0}^n(0) < \infty \quad (11),$$

в (10) можно заменить порядок суммирования и интегрирования. В результате получим

$$f_k(x) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} p_n \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \varphi_{k0}^n(r) dr, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (12).$$

С учетом свойств единственности (3) и мультипликативности (4), из (12) получим

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \varphi_{k0}^n(r) dr = \sum_{n=0}^{\infty} p_n f_{kn}(x), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (13),$$

где $f_{kn}(x)$ – плотность распределения случайной величины $X_k(n)$, определяемой соотношением (8).

Таким образом, плотность непрерывного распределения случайного числа случайных величин представляет собой смесь распределений с плотностями $f_{kn}(x)$ ($k=1, 2, \dots, K$; $n=1, 2, \dots$), вероятность появления которых в случайной выборке равна p_n .

Приемлемой моделью описания случайного количества модификаций технического объекта на фиксированную глубину прогноза (за фиксированный промежуток времени) является распределение Пуассона с параметром $\nu > 0$, равным среднему количеству модернизаций технического объекта в единицу времени. При его применении величина p_n определяется соотношением

$$p_n = \frac{(\nu T)^n}{n!} e^{-\nu T}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (14),$$

где T – глубина прогноза (промежуток времени, на который осуществляется прогнозирование результатов инновационного развития рассматриваемого технического объекта).

С учетом (14) соотношение (12) принимает вид

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\nu T)^n}{n!} e^{-\nu T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} \varphi_{k0}^n(r) dr, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (15).$$

Если предшествующая этапу прогнозирования информация о величине приращения в результате модернизаций k -й ($k=1, 2, \dots, K$) компоненты вектора (1) исчерпывается знанием среднего ее приращения μ_k в ходе одного акта модернизации, то, исходя из принципа «минимизации домыслов» (принципа максимума энтропии), случайные величины X_{kn} ($k=1, 2, \dots, K$, $n=0, 1, 2, \dots$) имеют экспоненциальные распределения с параметрами μ_k , т.е.:

$$f_k(x) = \mu_k e^{-\mu_k x}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (16).$$

Характеристические функции распределений (16) имеют вид

$$\varphi_{k0}(r) = (1 - ir\mu_k^{-1})^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (17).$$

Подставив (17) в (15), получим

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\nu T)^n}{n!} e^{-\nu T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-irx} (1 - ir\mu_k^{-1})^{-n} dr, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (18).$$

Из (18), используя табличный интеграл [32], получим

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\nu T)^n}{n!} e^{-\nu T} \frac{(\mu_k x)^{n-1} e^{-\mu_k x}}{\mu_k \Gamma(n)}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (19).$$

Из (19) следует, вероятность того, что в результате модернизации технического объекта к моменту времени T k -й компонент вектора (1) показателей его качества превысит заданную величину x_k^* , равна

$$P_k[x(T) > x_k^*] = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(vT)^n}{n!} e^{-vT} \int_0^{x_k^*} \frac{(\mu_k x)^{n-1} e^{-\mu_k x}}{\mu_k \Gamma(n)} dx \quad (20).$$

Соотношение (20) обеспечивает прогнозирование результатов инновационного развития технического объекта (изменения компонент вектора (1)) на установленную глубину прогноза T .

4. Выводы

На основе представления технического объекта вектором его показателей качества, проанализированы процессы инновационного развития рассматриваемого технического объекта, отражающиеся в дискретном изменении компонент вектора его показателей качества с течением времени.

Показано, что задача прогнозирования инновационного развития технического объекта сводится к задаче определения функции распределения суммы случайного числа случайных слагаемых.

Учтены особенности инерционности процесса инновационного развития в технической сфере, влияющие на глубину прогноза процессов инновационного развития.

Установлено, что задача прогнозирования инновационного развития технического объекта может быть сведена к задаче определения функций распределения сумм случайного числа случайных слагаемых, отражающих изменения компонент вектора показателей качества в ходе модернизации рассматриваемого объекта.

Продемонстрировано, что приемлемой моделью описания случайного количества модификаций технического объекта на фиксированную глубину прогноза является распределение Пуассона с параметром, равным среднему количеству модернизаций технического объекта в единицу времени.

Получено соотношение, обеспечивающее прогнозирование результатов инновационного развития технического объекта на установленную глубину прогноза.

Литература

1. *Тебекин А.В.* Проблемы стратегического развития национальной экономики // Стратегии бизнеса. – 2017. – № 7 (39). – С. 33–41.
2. *Анисимов В.Г.* Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятия решений, организация, оценка. – Санкт-Петербург, 2017. – 312 с.
3. *Чварков С.В.* Обоснование путей обеспечения устойчивости планов инновационного развития оборонно-промышленного комплекса // Военная мысль. – 2019. – № 7. – С. 114–119.
4. *Анисимов Е.Г.* Экономическая политика в системе национальной безопасности российской федерации // Вестник академии военных наук. – 2017. – № 1 (58). – С. 137–144.
5. *Сауренко Т.Н.* Концептуальные положения оценки эффективности инновационного развития компании // В сборнике: Экономические стратегии ЕАЭС: проблемы и инновации. Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции. Российский университет дружбы народов. – Москва, 2019. – С. 217–234.
6. *Анисимов В.Г.* Управление инновациями // Российская таможенная академия. Москва, 2017. – 452 с.
7. *Тебекин А.В.* Краткосрочный прогноз развития национальной экономики // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2018. – № 2. – С. 177–186.
8. *Тебекин А.В.* Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий. // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 3. – С. 31–37.

9. *Тебекин А.В.* Модель сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности качественных показателей / *А.В. Тебекин., Т.Н. Сауренко и др.* // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 77–83.
10. *Тебекин А.В.* Методика сравнительной оценки инновационных проектов по совокупности количественных показателей / *А.В. Тебекин., Т.Н. Сауренко и др.* // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 5. – С. 84–90.
11. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я.* Эффективность инвестиций: методологические и методические основы. – Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006. – 123 с.
12. *Анисимов В.Г.* Методологический подход к формализации показателей эффективности комплексного применения разведомственных ресурсов в интересах национальной обороны // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 11-12 (113-114). – С. 3–9.
13. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. – 2004. – № 4 (31). – С. 26-31.
14. *Анисимов Е.Г.* Показатели эффективности межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства / *Е.Г. Анисимов, В.Г. Анисимов и др.* // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 7-8 (97-98). – С. 12-16.
15. *Анисимов В.Г., Горбатов М.Ю., Сауренко Т.Н.* Модель динамики показателей экономического развития взаимодействующих государств // Вестник Российской таможенной академии. – 2013. – № 2. – С. 033–044.
16. *Анисимов В.Г.* Макромодель структурных изменений экономики государства на этапах ее эволюционного развития // Журнал исследований по управлению. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 69–77.
17. *Анисимов В.Г.* Обобщенный показатель эффективности взаимодействия федеральных органов исполнительной власти при решении задач обеспечения национальной безопасности государства // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 5-6 (107-108). – С. 101-106.
18. *Ильин И.В.* Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты – Санкт-Петербург, 2018. – 289 с.
19. *Анисимов Е.Г.* Модель поддержки принятия решений при формировании инновационной стратегии предприятия // Экономика сельского хозяйства России. – 2016. – № 3. – С. 53–59.
20. *Анисимов В.Г.* Теоретические основы управления инновациями. – Санкт-Петербург, 2016. – 472 с.
21. *Анисимов В.Г.* Методика расчета латентного эффекта применения системы управления рисками // Вестник Российской таможенной академии. – 2015. – № 2. – С. 115–123.
22. *Тебекин А.В.* Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций) // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 6. – С. 55–61.
23. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Оптимизационная модель распределения возобновляемых ресурсов при управлении экономическими системами // Вестник Российской таможенной академии. – 2007. – № 1. – С. 49-54.
24. *Anisimov V., Anisimov E., Sonkin M.* A resource-and-time method to optimize the performance of several interrelated operations // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 17. С. 38127-38132.

25. *Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Босов Д. Б.* Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами. – Москва, 2006. – 117 с.

26. *Тебекин А.В.* Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 65–72.

27. *Marchenko R.S., Anisimov V.G., Anisimov E.G., Saurenko T.N.* Model for comparative assessment of commercial seaports in global transport and logistics infrastructure // В сборнике: Atlantis Highlights in Computer Sciences. Proceedings of the International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019). 2019. С. 459-463. DOI: 10.2991/icdtli-19.2019.79.

28. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Чварков С.В.* Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. – 2020. – № 4. – С. 5-11.

29. *Анисимов В.Г.* Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности. – Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. – 288 с.

30. *Anisimov V.G., Anisimov E.G., Saurenko T.N., Sonkin M.A.* The model and the planning method of volume and variety assessment of innovative products in an industrial enterprise // Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах). 2017. Т. 803. № 1. С. 012006.

31. *Колмогоров А.Н., Прохоров Ю.В.* “О суммах случайного числа случайных слагаемых”, УМН, 4:4(32) (1949), 168–172.

32. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – Москва: Физматгиз, 1962. 1100 с. (стр. 332).

33. *Тебекин А.В.* Управление инновационно-инвестиционной деятельностью в сфере информационных технологий. – Москва: Палеотип, 2006. – 184 с.

34. *Сурат И.Л., Тебекин А.В.* Современные тенденции развития проектного управления в экономических системах. // Транспортное дело России. – 2014. – № 6. – С. 36–40.

35. *Тебекин А.В.* Методы принятия управленческих решений. // Учебник / Москва, 2016. Сер. 58 Бакалавр. Академический курс (1-е изд.). – 431 с.

36. *Тебекин, А. В.* Управление качеством: учебник для вузов / А. В. Тебекин. — 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 410 с.

37. *Тебекин, А. В.* Инновационный менеджмент: учебник для бакалавров / А. В. Тебекин. — 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 481 с.