

УДК 338.3:330.47

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

^{1,2}Ломазов В.А., ²Евсюков Д.Ю., ⁴Петросов Д.А., ³Сердюков В.С.¹Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина,
Белгород, e-mail: vlomazov@yandex.ru;²Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород;³Белгородский университет кооперации, экономики и права, Белгород;⁴Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва

Рассматривается проблема обеспечения необходимого уровня научной обоснованности организационно-экономических решений при внедрении инновационных технологий за счет использования методологического аппарата имитационного моделирования, позволяющего в рамках вычислительных экспериментов рассмотреть несколько возможных сценариев и выбрать наиболее рациональный из них. Целью работы является исследование возможности оценки адекватности (валидности) имитационных моделей инновационных производственно-экономических процессов. Основными результатами работы являются предложенный многокритериально-экспертный подход к оценке адекватности имитационной модели и построенная на его основе иерархия оценочных показателей. Научная новизна полученных результатов определяется интеграцией подходов многокритериального и экспертного оценивания, позволившей в рамках оценки адекватности имитационной модели учесть относительные значимости несовпадения вычисленных и контрольных значений отдельных характеристик процессов в заданные моменты времени в рамках тестовых вычислительных экспериментов; отдельных характеристик в составе выделенной (экономической, технологической, инновационной) группы характеристик; отдельного тестового вычислительного эксперимента, в составе комплекса экспериментов, а также экономической, технологической и инновационной составляющих моделируемого процесса в рамках цели исследования. Практическая значимость работы определяется возможностью использования числовых значений оценочных показателей адекватности имитационной модели инновационных производственно-экономических процессов для разработки и использования решающих правил валидации модели (переход к ее использованию или возврат на этап разработки концептуальной модели).

Ключевые слова: инновация, имитационное моделирование, адекватность, многокритериальное оценивание, экспертные технологии

ASSESSMENT OF ADEQUACY OF IMITATION MODELING OF INNOVATIVE PRODUCTION AND ECONOMIC PROCESSES

^{1,2}Lomazov V.A., ²Evsyukov D.Yu., ⁴Petrosov D.A., ³Serdyukov V.S.¹Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, Belgorod, e-mail: vlomazov@yandex.ru;²Belgorod National Research University, Belgorod;³Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod;⁴Finance University under the Government of the Russian Federation, Moscow

The problem of ensuring the necessary level of scientific substantiation of organizational and economic decisions when introducing innovative technologies through the use of the methodological apparatus of simulation modeling, which allows us to consider several possible scenarios within the framework of computational experiments and select the most rational of them, is considered. The aim of the work is to study the possibility of assessing the adequacy (validity) of simulation models of innovative production and economic processes. The main results of the work are the proposed multi-criteria expert approach to assessing the adequacy of the simulation model and the hierarchy of estimated indicators built on its basis. The scientific novelty of the results is determined by the integration of multicriteria and expert assessment approaches, which allowed taking into account the relative significance of the mismatch between the calculated and control values of individual process characteristics at specified points in time as part of test computational experiments in the framework of assessing the adequacy of the simulation model; individual characteristics as part of a dedicated (economic, technological, innovative) group of characteristics; a separate test computational experiment, as part of a set of experiments, as well as the economic, technological and innovative components of the simulated process as part of the research objective. The practical significance of the work is determined by the possibility of using the numerical values of the estimated indicators of the adequacy of the simulation model of innovative production and economic processes for the development and use of decision rules for model validation (transition to its use or return to the stage of development of the conceptual model).

Keywords: innovation, simulation, adequacy, multi-criteria assessment, expert technologies

Революционные изменения в развитии современной экономики во многом связаны с появлением новых (аддитивных, бережливых, роботизированных и т.д.) технологий, позволяющих значительно повысить эф-

фективность производства. Однако отсутствие достаточного опыта использования технологических инноваций не позволяет предусмотреть (и в должной мере компенсировать) их возможные негативные эко-

номические последствия. Так, например, недостаточно продуманное внедрение современных агротехнологий может привести к негативным структурным изменениям на рынке труда и, как следствие, к снижению устойчивости социально-экономического развития сельских территорий. При этом общие методологические положения федеральных ([1, 2]) и региональных ([3]) программ в сфере инноватики не могут быть просто перенесены на уровень предприятий (организаций), непосредственно внедряющих инновации, что делает практически значимой задачу поддержки принятия научно обоснованных организационно-экономических решений по выбору способов внедрения и использования инновационных производственных технологий.

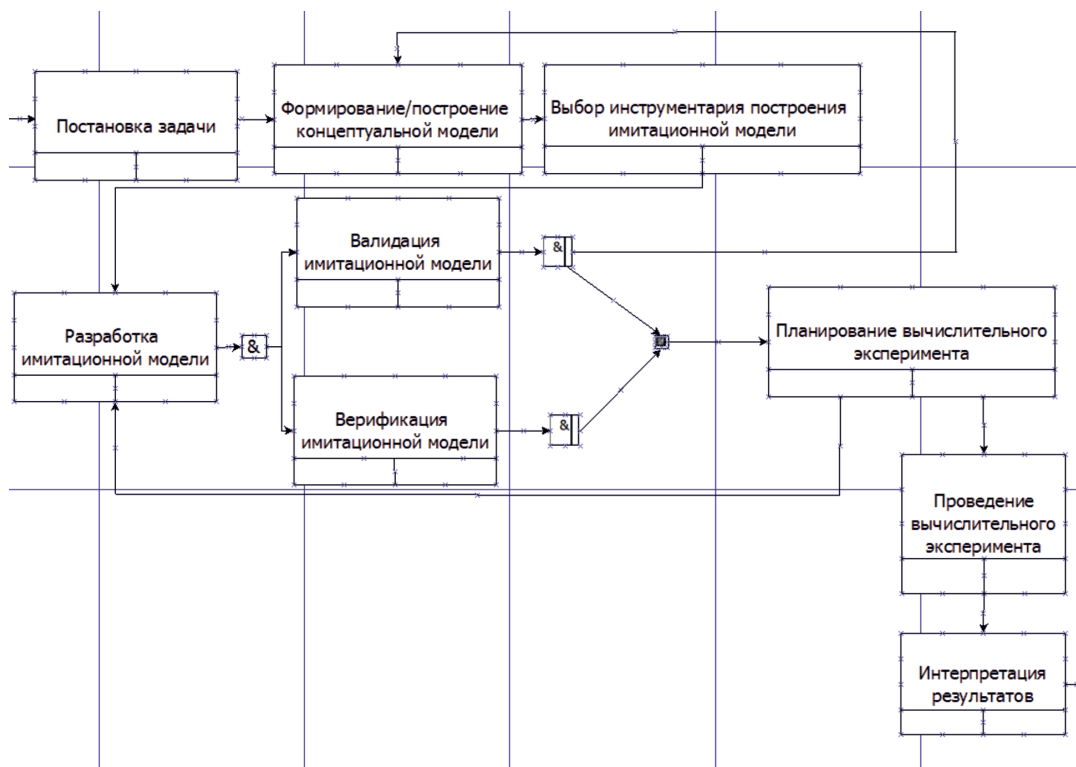
Одним из эффективных подходов к решению этой задачи является использование инструментария имитационного моделирования [4], позволяющего в рамках вычислительного эксперимента рассмотреть различные сценарии и выбрать наиболее рациональный (оптимальный) из них. При этом (несмотря на развитие методологии имитационного моделирования [5, 6]) остается актуальной научная задача разработки специализированных инструментальных

средств моделирования инновационных производственно-экономических процессов.

Цель исследования состоит в разработке инструментария количественной оценки степени адекватности рассматриваемой имитационной модели анализируемым инновационным производственно-экономическим процессам, что является одним из основных этапов моделирования.

Материалы и методы исследования

Методология имитационного моделирования предполагает выполнение этапов, формализованно представленное в нотации IDFF3 ([7]) на рисунке. Для обеспечения достоверности результатов важное значение имеет тестирование имитационной модели, содержание которого связано не только с выявлением ошибок программной реализации модели (верификация), но и с проверкой ее адекватности (валидация), предполагающей сравнение результатов модельных вычислительных экспериментов с известными данными, полученными на изучаемом объекте. Неудовлетворительные результаты проверки предполагают возврат и прохождение трех предыдущих этапов имитационного моделирования на более высоком методологическом уровне.



Контекстная диаграмма процесса имитационного моделирования в нотации IDFF3, разработанная с использованием редактора диаграмм Dian (проект GNU)

Специфика инновационных процессов должна быть учтена при формировании перечня сравниваемых характеристик и оценочных показателей соответствия их вычисленных значений контрольным значениям, а также при построении способа вычисления значений этих показателей.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим формальное представление дискретной имитационной модели инновационных производственно-экономических процессов Im в виде кортежа:

$$Im = \langle Char, Temp, Func \rangle, \quad (1)$$

где $Char$ – совокупность характеристик исследуемого процесса;

$Temp = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – совокупность моментов времени, в которые рассматриваются значения характеристик процесса (моменты времени могут быть выбраны равномерно из некоторого интервала или связаны с определенными событиями);

$Func$ – совокупность функциональных зависимостей между значениями характеристик процесса в рассматриваемые моменты времени.

В рамках методологии PESTI-анализа (в соответствии с [8, 9]) для исследования инновационных производственно-экономических процессов ограничимся рассмотрением только экономической (Economic, E), технологической (Technical, T) и инновационной (Inovatic, I) составляющих процесса, что позволяет выделить из множества характеристик $Char$ подмножество характеристик $CharE, CharT, CharI$, соответствующих этим составляющим:

$$\begin{aligned} CharE, CharT, CharI &\subset Char, \\ CharE \cup CharT \cup CharI &= Char, \end{aligned} \quad (2)$$

$$CharE = \{CharE_1, CharE_2, \dots, CharE_{s(E)}\},$$

$$CharT = \{CharT_1, CharT_2, \dots, CharT_{s(T)}\},$$

$$CharI = \{CharI_1, CharI_2, \dots, CharI_{s(I)}\}.$$

Рассмотрим характеристики процесса (2) в заданные моменты времени:

$$CharE_r(t_i), r = 1, 2, \dots, s(E), \quad (3)$$

$$CharT_r(t_i), r = 1, 2, \dots, s(T),$$

$$CharI_r(t_i), r = 1, 2, \dots, s(I),$$

$$t_i \in T.$$

Хотя представленный набор характеристик (3) полностью описывает инновационный производственно-экономический

процесс, его непосредственное использование для решения задач оценки валидности имитационной модели представляется неоправданным в силу большого числа и разной степени значимости характеристик (3). В связи с этим предлагается наряду с характеристиками (3) использовать агрегированные по времени (взвешенные средние по времени) характеристики (2), используя формулы аддитивной свертки:

$$Char_r E = \sum_i^n w_{ir}^E CharE_r(t_i), \sum_i^n w_{ir}^E = 1,$$

$$w_{ir}^E \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n), r = 1, 2, \dots, s(E), \quad (4)$$

$$Char_r T = \sum_i^n w_{ir}^T CharT_r(t_i), \sum_i^n w_{ir}^T = 1, w_{ir}^T \geq 0,$$

$$(i = 1, 2, \dots, n), r = 1, 2, \dots, s(T)$$

$$Char_r I = \sum_i^n w_{ir}^I CharI_r(t_i), \sum_i^n w_{ir}^I = 1, w_{ir}^I \geq 0,$$

$$(i = 1, 2, \dots, n), r = 1, 2, \dots, s(I)$$

$$t_i \in T,$$

где весовые коэффициенты $w_{ir}^E, w_{ir}^T, w_{ir}^I$ отражают относительную важность значений характеристик $CharE_r, CharT_r, CharI_r$ в разные моменты времени из множества $Temp$. Весовые коэффициенты могут быть определены в результате обработки экспертных суждений (например, методом парных сравнений [10]), что, однако, требует отдельного исследования вопроса чувствительности решения к возможным изменениям мнений экспертов [11]. Следует отметить, что поскольку соответствующие исходные (3) и агрегированные по времени (2) характеристики инновационных производственно-экономических процессов имеют одинаковую размерность, то использование (4) не требует их предварительного приведения к безразмерному виду. В случае построения полной иерархии показателей ([12]), предполагающей последующее агрегирование характеристик $CharE_r, CharT_r, CharI_r$ по соответствующим подмножествам характеристик ($CharE, CharT, CharI$) такая процедура была бы необходима.

Оценим показатели степени соответствия значений характеристик $CharE_r(t_i), CharT_r(t_i), CharI_r(t_i), j = 1, 2, \dots, m$, полученных в результате вычислительного эксперимента $CompExp_j (j = 1, 2, \dots, m)$ с использованием имитационной модели (1), имеющимся тестовым «контрольным» значениям $TestCharE_r(t_i), TestCharT_r(t_i), TestCharI_r(t_i)$ (здесь индекс $j = 1, 2, \dots, m$ соответствует номеру вычислительного эксперимента).

Вербально-числовая шкала оценки результатов тестовых вычислительных экспериментов

№ п/п	Вербальное значение показателя степени соответствия	Числовое значение показателя степени соответствия
1	«очень низкий»	0
2	«низкий»	0,25
3	«средний»	0,5
4	«высокий»	0,75
5	«очень высокий»	1

Поскольку показатель соответствия $Cong(CharE_r(t_i), TestCharE_r(t_i))$ (а также $Cong(CharE_r(t_i), TestCharE_r(t_i))$, $Cong(CharE_r(t_i), TestCharE_r(t_i))$) должен отражать не только близость числовых значений (что обычно моделируется в виде абсолютной величины разности, относительной разности или отношения соответствующих значений), но и специфику предметной области (включая особенности экономической задачи, решаемой с использованием аппарата имитационного моделирования), то для его измерения предлагается использовать вербальные экспертные оценки в шкале с пятью уровнями градации: < «очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий» >. Для перехода от вербальных значений к числовым значениям показателя соответствия воспользуемся методом семантического дифференциала ([13]), в результате чего получим модифицированную (смещенную и нормированную) шкалу Осгуда, представимую таблицей.

Безразмерный вид оценочных показателей $Cong(CharE_r(t_i), TestCharE_r(t_i))$, $Cong(CharT_r(t_i), TestCharT_r(t_i))$, $Cong(CharI_r(t_i), TestCharI_r(t_i))$ позволяет не только стоять соответствующие агрегированные по времени показатели соответствия (используя аналоги формул (4) при сохранении обозначений из (4)):

$$Cong(CharE_{r,j}, TestCharE_{r,j}) = \sum_i^n w_{ir}^E Cong(CharE_r(t_i)_j, TestCharE_r(t_i)_j), \quad (5)$$

$$Cong(CharT_{r,j}, TestCharT_{r,j}) = \sum_i^n w_{ir}^T Cong(CharT_r(t_i)_j, TestCharT_r(t_i)_j),$$

$$Cong(CharI_{r,j}, TestCharI_{r,j}) = \sum_i^n w_{ir}^I Cong(CharI_r(t_i)_j, TestCharI_r(t_i)_j),$$

но и проводить агрегирование более высокого уровня.

Проведем агрегирование показателей $Cong(CharE(t_i), TestCharE(t_i))$, $Cong(CharE(t_i), TestCharE(t_i))$, $Cong(CharE(t_i), TestCharE(t_i))$ (полученных при помощи формул (5)) по множествам $CharE$, $CharT$, $CharI$, получив общие показатели степени соответствия экономических, технологических и инновационных характеристик, полученных в результате вычислительного эксперимента $CompExp_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$), контрольным значениям:

$$Cong(CharE_j, TestCharE_j) = \sum_r^{s(E)} w_r^E Cong(CharE_{r,j}, TestCharE_{r,j}), \quad (6)$$

$$Cong(CharT_j, TestCharT_j) = \sum_r^{s(T)} w_r^T Cong(CharT_{r,j}, TestCharT_{r,j}),$$

$$Cong(CharI_j, TestCharI_j) = \sum_r^{s(I)} w_r^I Cong(CharI_{r,j}, TestCharI_{r,j}),$$

где весовые коэффициенты w_r^E, w_r^T, w_r^I отражают относительную важность характеристик $CharE_r, CharT_r, CharI_r$ в своих группах характеристик $CharE, CharT, CharI$. При этом выполняются обычные условия неотрицательности и нормировки входящих в (6) весовых коэффициентов:

$$\sum_r^{s(E)} w_r^E = 1, \quad w_r^E \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s(E), \quad (7)$$

$$\sum_r^{s(T)} w_r^T = 1, \quad w_r^T \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s(T),$$

$$\sum_r^{s(I)} w_r^I = 1, \quad w_r^I \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s(I).$$

Поскольку формулы (6), (7) определяют качество моделирования применительно к экономической, технологической и инновационной составляющей исследуемого процесса в рамках одного тестового вычис-

лительного эксперимента $CompExp_j$, то естественно обобщить эти показатели для всего комплекса тестовых экспериментов $CompExp = \{CompExp_1, CompExp_2, \dots, CompExp_m\}$:

$$\begin{aligned} Cong(CharE, TestCharE) &= \\ &= \sum_j^m w_j^E Cong(CharE_j, TestCharE_j), \quad (8) \\ Cong(CharT, TestCharT) &= \\ &= \sum_j^m w_j^T Cong(CharT_j, TestCharT_j), \\ Cong(CharI, TestCharI) &= \\ &= \sum_j^m w_j^I Cong(CharI_j, TestCharI_j), \end{aligned}$$

где весовые коэффициенты w_j^E, w_j^T, w_j^I отражают относительную значимость вычислительных экспериментов $CompExp_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) для определения экономических, технологических и инновационных характеристик моделируемого процесса в рамках дальнейших исследований (условия тестовых экспериментов могут в разной степени соответствовать условиям вычислительных экспериментов, выполнение которых предполагается в рамках имитационного моделирования исследуемых инновационных производственно-экономических процессов). Для весовых коэффициентов относительной значимости вычислительных экспериментов также должны выполняться условия неотрицательности и нормировки весовых коэффициентов:

$$\begin{aligned} \sum_j^m w_j^E = 1, \quad \sum_j^m w_j^T = 1, \quad \sum_j^m w_j^I = 1, \quad w_j^E \geq 0, \\ w_j^T \geq 0, \quad w_j^I \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (9) \end{aligned}$$

Иерархию показателей степени соответствия результатов тестовых вычислительных экспериментов $CompExp$ контрольным значениям завершает общий показатель $Cong(Char, CompExp)$, определяемый в виде аддитивной свертки

$$\begin{aligned} Cong(Char, TestChar) &= \\ &= w^E Cong(CharE, TestCharE) + \\ &+ w^T Cong(CharT, TestCharT) + \\ &+ w^I Cong(CharI, TestCharI), \end{aligned} \quad (10)$$

где весовые коэффициенты w^E, w^T, w^I ($w^E, w^T, w^I \geq 0, w^E + w^T + w^I = 1$) отражают относительную значимость экономических, тех-

нологических и инновационных составляющих моделируемых процессов в рамках исследования.

Заключение

Построенная иерархия оценочных показателей позволяет комплексно оценить рассматриваемую имитационную модель инновационных производственно-экономических процессов за счет учета экспертных суждений, отражающих:

- относительную важность несоответствия вычисленных и контрольных значений отдельных характеристик процессов в заданные моменты времени в рамках тестовых вычислительных экспериментов;
- относительную значимость отдельных характеристик в составе выделенной (экономической, технологической, инновационной) группы характеристик;
- относительную значимость отдельного тестового вычислительного эксперимента (как степень его соответствия планируемым экспериментам в рамках предстоящего имитационного исследования) в составе комплекса экспериментов;
- относительную значимость экономической, технологической и инновационной составляющих моделируемого процесса в рамках цели исследования.

Практическая значимость работы связана с возможностью использования числовых значений оценочных показателей степени соответствия (адекватности) имитационной модели инновационных производственно-экономических процессов для разработки и использования решающих правил валидации модели (переход к ее использованию или возврат на этап разработки концептуальной модели).

Планируемые дальнейшие исследования связаны с использованием построенных оценочных показателей при эволюционном структурно-параметрическом синтезе (в соответствии с методологией [14]) имитационных моделей инновационных производственно-экономических процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках научного проекта № 18-47-310008.

Список литературы

1. Луховская О.К., Перов В.И., Савкина Р.В. Комплексные целевые программы в решении задач инновационного развития экономики // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 3 (55). С. 76–85.
2. Пивоварова Н.В. Государственные программы Российской Федерации как инструмент инновационного развития // Вестник ОГУ. 2014. № 14 (175). С. 324–330.
3. Юсупов Р.М., Бостанова А.И. Теоретико-методические аспекты разработки государственных программ на ре-

гиональном уровне // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2014. № 4 (64). С. 41.

4. Бендиков М.А., Фролов И.Э., Тресорук А.А. Исследование инновационной экономики: экономико-математические инструментари и возможности его применения // Вестник ЦЭМИ. 2018. № 2. С. 4.

5. Журавлев С.С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем // СО РАН, Новосибирск. Россия, 2010. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010-guravlev.pdf> (дата обращения: 14.01.2020).

6. Гусев П.Ю., Скрипченко Ю.С., Школьников Ю.М. Особенности иерархической структуры объектов в имитационных моделях больших производственных систем // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 75–81.

7. Вейцман В.М. Проектирование информационных систем. СПб.: Лань, 2019. 316 с.

8. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: ЛЕНАНД, 2019. 360 с.

9. Ломазов В.А., Нестерова Е.В. Критерии оценки инвестиционных инновационных проектов в сфере здраво-

охранения // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2013. № 4. С. 155–159.

10. Саати Т.Л. Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосязаемых факторов // Cloud Of Science. 2016. Т. 3. № 2. С. 171–262.

11. Ломазов В.А., Михайлова В.Л., Петросов Д.А., Тюкова Л.Н. Методика вычислительных экспериментов по оценке устойчивости управленческих решений от изменений экспертных суждений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 5–3. С. 521.

12. Ломазов В.А., Ломазова В.И., Нехотина В.С. Информационные модели и методы многокритериальной оценки региональных социально-экономических проектов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2013. № 1 (144). С. 112–116.

13. Белянин В.П. Психоллингвистика. М.: Флинта, 2009. 420 с.

14. Lomazov V.A., Petrosov D.A., Dobrunova A.I., Lomazova V.I., Matorin S.I. Evolutionary selection of the models of interacting processes on the basis of expert assessments. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11. № 3. P. 1867–1873.