

УДК 519.876.5

## ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Шаститко Д.В., Новыш Б.В. (Минск, Республика Беларусь)

### Введение

С ростом сложности современных бизнес-сред, изменчивой природы рынков, высокой волатильности и возникновением угроз в виде «черных лебедей» принятие управленческих решений становится все более сложным и ответственным процессом. В свете этой динамики, имитационное моделирование приобретает все большую популярность как инструмент, способствующий более эффективному и информированному принятию решений. В данной статье мы рассмотрим ограничения применения имитационного моделирования для управленческих решений в условиях неопределенности, а также важное значение автоматизации и рациональной организации процессов принятия решений в этом контексте.

### Классификация имитационных моделей для принятия экономических решений

Имитационное моделирование позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР), создавать виртуальные модели экономических систем, которые могут быть использованы для оценки и сравнения различных стратегий и сценариев. Варианты задач для применения моделей разнообразны, примерная классификация может выглядеть следующим образом:

1. Прогнозирование и стратегическое планирование. Имитационное моделирование на стратегическом уровне управления позволяет предпринимателям и руководителям предсказывать влияние вероятных экономических событий или воздействий на значимые показатели или цели. В качестве примера можно привести анализ портфеля инвестиционных проектов [2]. Разработка структуры модели с учетом различных внешних и внутренних факторов (изменения на рынке, спрос, конкуренция и изменения внутри компании и т.д.) позволяет разрабатывать стратегии, которые максимизируют прибыль и минимизируют риски.

2. Оптимизация бизнес-процессов. Имитационное моделирование на операционном уровне может быть использовано для анализа и оптимизации бизнес-процессов. Модели, описывающие существующие процессы, позволяют: во-первых, выявить узкие места и находить способы повышения эффективности, во-вторых, экспериментировать с внедрением различных улучшений и изменений без негативного воздействия на организацию процесса и персонал.

3. Управление рисками. Обычно выделяется в особый класс задач, описывающий конкретные вероятные проблемы как стратегического уровня, например портфеля проектов, так и тактического или даже операционного на уровне отдельных проектов. Имитационное моделирование позволяет оценить вероятность различных сценариев и их влияние на ключевые показатели эффективности. Это помогает ЛПР: во-первых, принимать обоснованные решения, учитывая возможные риски, во-вторых – разрабатывать планы по управлению рисками.

4. Задачи обучения. Имитационное моделирование предоставляет возможность проводить эксперименты в виртуальной среде без риска для реальных бизнес-процессов, что может быть полезным для обучения, проверки новых идей и стратегий, а также для тестирования гипотез [3].

Сравнительно более простыми представляются модели 2 и 3-го классов, так как они наиболее приближены к реальности и, как правило, не требуют высокого уровня абстракции, выявления сложных причинно-следственных взаимосвязей, которые в этих случаях зачастую самоочевидны. Модели для обучения также разрабатываются под конкретную учебную задачу и могут демонстрировать один или несколько аспектов реальности в зависимости от поставленной цели.

Поэтому предметом исследования в данной статье в большей степени являются модели 1-го класса – призванные описать сложную экономическую систему с учетом и в рамках установленных закономерностей. Описанию некоторых из этих рамок посвящены следующие разделы.

### **Рамка 1. Сложность и ограничения вычислительной мощности**

Ограничения, связанные с наличием ресурсов, технологий и инструментов характерны для всех типов моделей. Для этой рамки область возможных и эффективных решений постоянно расширяется с развитием технических средств и самих систем моделирования. Подробно этот вопрос рассмотрен, например, в [1]. Для экономических задач часто целесообразность создания модели определяется не необходимой вычислительной мощностью, а научными и организационными аспектами, однако понимание технологических ограничений учитывать необходимо всегда.

### **Рамка 2. Нелинейность**

В реальности бизнеса и управления события редко следуют линейному и предсказуемому пути. Нелинейность и наличие "черных лебедей" (событий с малой вероятностью и катастрофическими последствиями) являются важными аспектами, которые могут серьезно повлиять на планирование и управление организациями [4, 5].

Сложность учета такой природы больших динамических систем и дальнейшее построение моделей определяется следующими факторами:

1. Относительная сложность в математическом представлении. Нелинейные взаимосвязи часто не могут быть корректно описаны простыми линейными уравнениями и требуются более сложный математический и вычислительный аппарат (нечеткие множества, нейросети, системы дифференциальных уравнений и т.д.).

2. Чувствительность к начальным условиям. Нелинейные системы часто проявляют чувствительность к начальным условиям. Малые изменения в исходных данных могут привести к значительным изменениям в смоделированном будущем состоянии системы. Это усложняет прогнозирование поведения системы в долгосрочной перспективе и накладывает серьезные требования к качеству исходных данных.

3. Нелинейный шум и неопределенность. Следствием чувствительности исходным данным является сильная подверженность случайным воздействиям (нелинейный шум), что делает поведение системы менее предсказуемым и усложняет моделирование.

4. Высокая размерность. Сложные нелинейные модели могут иметь высокую размерность, что означает наличие большого числа переменных и параметров. Это обстоятельство делает процесс моделирование сложным и требует больше данных для анализа.

5. Нелинейная взаимозависимость элементов системы. Нелинейность может проявляться в сложных взаимодействиях между различными факторами в системе. Их выявление и последующий учет затрудняет построение модели.

Перечисленные выше факторы с одной стороны ограничивают применение имитационных моделей, с другой стороны являются основным конкурентным преимуществом – имитационное моделирование делает возможным описание таких сложных систем.

### **Рамка 3. Когнитивные искажения**

Когнитивные искажения – это психологические факторы, которые могут систематически исказить наше понимание и оценку сложных ситуаций и принимаемых решений. Они могут включать в себя предвзятость, ограниченность восприятия, эмоциональное влияние и другие аспекты.

Имитационное моделирование (как и любое формальное описание действительности) предоставляет мощный инструмент для борьбы с когнитивными искажениями, позволяя ЛПП получать более объективную и качественную информацию для принятия решений. Это достигается за счет:

1. Объективное описание проблемы. Имитационные модели предоставляют абстрактные, но строго логические представления реальных ситуаций. Они освобождают решателей от субъективных оценок и влияния эмоционального состояния, что способствует более объективному анализу ситуации.

2. Рассмотрение нескольких сценариев. Имитационное моделирование позволяет проводить эксперименты с различными сценариями и стратегиями, что помогает учитывать разные возможные варианты развития событий. Например, простое включение в процесс рассмотрения альтернативного сценария полностью исключает влияние иллюзии альтернативы.

3. Визуализация и интерпретация данных. Имитационные модели могут визуализировать сложные экономические и бизнес-процессы, что делает их более понятными и доступными для анализа.

4. Оценка конкретных событий и рисков. Имитационное моделирование может помочь оценить риски и вероятности разных исходов, что помогает сделать осознанные решения, основанные на статистических данных и фактах, а не на субъективных предположениях.

5. Снижение влияния ошибки планирования. В поведенческой экономике широко известны и активно изучаются различные вариации ошибок при планировании:

5.1. Неверный учет времени и ресурсов. Классической ошибкой планирования является недооценка времени и ресурсов, необходимых для выполнения задачи или проекта. При проведении имитационного эксперимента уже на этапе первичного анализа для построения модели выявляются все нереалистичные ожидания.

5.2. Игнорирование неопределенности. Планирование, основанное на идеализированном представлении, что все события будут развиваться идеально, часто оказывается неверным. Имитационная модель позволяет рассмотреть влияние неучтенных факторов.

5.3. Неверная расстановка приоритетов. Неправильное определение приоритетов в плане может привести к тому, что важные задачи остаются нерешенными, а незначительным уделяется излишнее внимание. Построение модели позволяет пересмотреть выбранное решение с точки зрения потенциального полученного результата.

Описанные выше и многие другие ошибки в мышлении и восприятии являются систематическими, а их учет и коррекция при применении имитационного моделирования хотя и имеет место, но не снимает проблему поскольку искажения могут проявляться незаметно, влиять на восприятие и интерпретацию информации в

построенных моделях, а также искажать выявленные закономерности, а значит и саму структуру моделей, вычислительных алгоритмов.

Систематичность ошибок «интуитивного» восприятия создает шаблоны в нашем мышлении, а эволюционная природа возникновения предопределяет подверженность искажениям вне зависимости от образования и экспертности [8]. Единственным надежным способом их устранения является понимание и учет этих искажений при анализе информации, построении моделей и принятии решений, особенно в экономике и управлении.

### **Искажения в интервальных экспертных оценках**

Интервальные экспертные оценки – это метод получения оценок и прогнозов, при котором эксперты предоставляют интервалы значений, которые, по их мнению, могут соответствовать исследуемой переменной или явлению. Он широко применяется в экономике в случае отсутствия достаточного объема исходных данных для моделирования и призван учитывать неопределенность и субъективность в оценках экспертов. Однако само применение метода связано с неизбежным возникновением различных видов искажений, которые могут существенно влиять на результаты анализа.

Укрупненно рассмотрим основные группы искажений при использовании интервальных экспертных оценок:

1. Искажения, связанные с субъективностью экспертов. Эксперты могут иметь разные точки зрения и толкования интервалов, что может привести к различным результатам. Хотя по сравнению с точечными оценками влияние субъективных факторов снижается, появляется большое количество негативных эффектов, связанных именно с интервальным оцениванием. Например, излишняя самоуверенность в оценке приводит к получению слишком узкого интервала.

2. Искажения, связанные с психологическим состоянием экспертов. Например, эксперты могут подвергаться воздействию психологических факторов, таких как оптимизм или пессимизм, могут недооценивать риски или преувеличивать вероятность определенных событий, что приводит к искажениям в интервальных оценках.

3. Неполнота информации. Эксперты могут неверно оценивать явления или события, о которых у них нет полной информации. Недостаток данных может привести к получению слишком широких или слишком узких интервалов, систематическому смещению в ту или иную сторону и неопределенности в оценках. Также влияние может оказывать порядок получения исходных сведений – эффект прайминга и т.д.

4. Игнорирование корреляции. Интервальные оценки могут игнорировать взаимосвязь и корреляцию между различными переменными. Это может привести к неверным оценкам, слишком узким диапазонам, особенно при анализе сложных систем [9].

5. Неучтенные внешние факторы. Искажения также могут возникать из-за непредвиденных событий и факторов, которые не были учтены в интервальных оценках. Классический пример – появление «черных лебедей», небольшая вероятность появления которых или не учитывается вовсе или может оказывать чрезмерное влияние на оценки отдельных экспертов.

6. Разная интерпретация и неоднородность оценок. Интервалы, предоставляемые разными экспертами, могут быть неоднородными, что затрудняет их сравнение и анализ.

Интервальные экспертные оценки являются важным инструментом для учета неопределенности в анализе данных и принятии решений, без которого обойтись иногда просто невозможно. Однако, как и любой метод формального описания

реальности человеком, они подвержены искажениям, связанным с субъективностью, психологическими факторами и др. Для снижения влияния искажений при использовании интервальных оценок необходимо внимательно выбирать и обучать экспертов (например, проводить сессии «калибровки» [10]), учитывать психологические и внешние факторы, а также проводить анализ и сравнение интервалов с осторожностью и с использованием дополнительных методов коррекции и оценки.

#### **Рамка 4. Возможность верификации модели**

Верификация имитационной модели для экономических задач – это важный процесс подтверждения того, что модель правильно репрезентирует основные аспекты реальной экономической системы в рамках поставленной цели [6]. Однако исходя из природы решаемой проблемы процесс верификации может быть затруднительным или в некоторых случаях вообще невозможным. Негативными факторами могут быть следующие:

1. Ограниченность данных. Верификация модели требует наличия данных о реальной экономической системе достаточного объема и качества. Однако в экономике данные могут быть неполными, неточными или даже отсутствовать, особенно при анализе долгосрочных тенденций или эффектов. Ограниченность данных не только усложняет построение модели, но в значительной степени затрудняет ее верификацию.

2. Временные интервалы. Время, которое необходимо для реализации предлагаемых изменений, достижения поставленных целей может быть существенным. Это повышает вероятность появления непредвиденных событий.

3. Конфиденциальность данных. Некоторые данные, необходимые для верификации модели, могут быть конфиденциальными, и доступ к ним может быть ограничен.

4. Сложность и динамика. Экономические системы являются сложными и динамическими, и их поведение может сильно изменяться со временем и под воздействием различных факторов. Всегда существует риск упустить значимые факторы, «подогнать» модель под исторические данные и ошибиться.

5. Ограниченность знаний. В экономике часто существуют ограничения в имеющейся информации, например, о скрытых закономерностях, внутренних процессах компаний или о решениях отдельных индивидов, что может затруднить верификацию модели.

6. Неопределенность и стохастичность. Экономические явления могут быть подвержены случайным колебаниям и неопределенности, что усложняет как точное прогнозирование, так и верификацию модели.

7. Неоднозначность результатов. Интерпретация результатов моделирования в экономике может быть неоднозначной. Например, важность тех или иных экономических показателей может меняться в зависимости от текущей стратегии компании.

8. Ограничения в моделировании экономических агентов. Моделирование индивидуальных агентов и их стратегий в современной экономической науке требует учета в том числе разнообразных поведенческих факторов [7].

Несмотря на перечисленные ограничения, верификация имитационных моделей в экономике остается необходимым атрибутом для понимания и анализа экономических систем для принятия информированных решений. С другой стороны, при планировании исследования и моделировании необходимо рационально оценивать надежность полученных результатов и соблюдать принципы ответственного моделирования.

### **Цикл адаптации модели как инструмент повышения качества управления**

Описанные выше рамки являются неотъемлемой частью процесса моделирования как упрощенного описания действительности. С одной стороны, каждая из них ограничивает потенциальные результаты имитационной модели, что уже является полезным, с другой – показывает возможности и конкурентные преимущества имитационных моделей относительно, например, аналитических, при помощи которых решать описанные сложные проблемы еще более затруднительно.

Для управления в отсутствие идеального инструмента, способного заранее с безукоризненной точностью предсказывать результат, в управленческой науке разработана интуитивно понятная модель с обратной связью. Известно большое количество ее вариаций в современном менеджменте, например, модель Деминга – Шухарта и др.

При нецелесообразности применения управления неопределенностью при помощи планирования – описания заранее желаемого состояния, действий и ресурсов, применяют управление неопределенностью при помощи гибкости – деление общего объема работ на относительно короткие итерации с обратной связью и корректировками. Современной реализацией данного подхода является Agile, который применим также и для имитационного моделирования [11].

Второй подход, как и первый имеет свои достоинства и недостатки. Основным из которых является необходимость помимо всех необходимых действий планового подхода (целеполагание, планирование, организация, координация и т.д.) организации этого цикла обратной связи. Организационные изменения при этом достаточно сложны и выходят за рамки данной статьи.

При решении проблемы итерационным методом с привлечением технологий имитационного моделирования, сам процесс моделирования также должен претерпеть изменения и превратиться в цикл, обеспечивающий предоставлением некоторой ценности на каждой последующей итерации.

Предлагаемый цикл адаптации модели – это процесс периодической проверки, корректировки и улучшения имитационной модели с течением времени. Этот процесс позволяет модели адаптироваться к изменяющимся условиям и оставаться актуальной и эффективной. Цикл адаптации модели может состоять из следующих этапов:

1. Сбор данных. Сбор или обновление актуальных данных, которые будут использоваться для моделирования. Это могут быть данные о текущих бизнес-процессах, ресурсах, рыночных условиях и др. Значительную роль при практической реализации данного пункта играет автоматизация – доступ к источникам данных, автоматическая обработка при помощи ETL-процессов и т.д.

2. Анализ данных. Проведение анализа данных необходимо для определения пригодности данных для существующей модели и выявления новых факторов и параметров, которые необходимо учесть в обновленной модели.

3. Обновление структуры модели. Исходя из новых данных и анализа, структура модели должна быть обновлена, включая изменение переменных, параметров, алгоритмов и других элементов модели.

4. Валидация и тестирование. После обновления модели проведите валидацию и тестирование, чтобы убедиться, что она по-прежнему дает точные и надежные результаты. На этом этапе также важную роль играет автоматизация тестирования [12].

5. Использование модели. Если обновленная модель дает более точные или полезные результаты, они могут быть реализованы в виде изменений в реальных бизнес-процессах или стратегиях.

6. Мониторинг и оценка результативности моделирования. Для оценки модели необходим сбор реальных данных о реакции системы на предложенные изменения, влиянии на исполняемые бизнес-процессы и достижение целей.

7. Анализ обратной связи. Чтобы описанная схема имела смысл необходимо провести анализ обратной связи, оценить ценность, привнесенную процессом моделирования для конкретных пользователей, стейкхолдеров и достижения целей организации (по аналогии с Sprint Review в Scrum). Также необходимо извлечь уроки и оптимизировать сам процесс (по аналогии с ретроспективой в Scrum).

Цикл адаптации модели должен быть непрерывным и регулярным процессом, который позволяет модели оставаться актуальной и эффективной в меняющейся среде. При этом целесообразно синхронизировать итерации с итерациями моделируемого процесса, чтобы на каждом новом этапе решения принимались с учетом обновленных моделей. С другой стороны, цикл адаптации может использоваться совершенно отдельно – для организации итеративной разработки модели с удовлетворяющим заказчика качеством.

Безусловно, реализация такого цикла потребует серьезных дополнительных организационных усилий – выстраивание процессов моделирования, автоматизации, документирования, управления изменениями, изменения в организационной культуре и т.д.

### **Выводы и результаты**

1. Современные ограничения и вызовы, с которыми сталкиваются управленцы при принятии решений, требуют использования всего инструментария моделирования, в том числе имитационного для принятия обоснованных и своевременных решений.

2. Классические подходы к управлению неопределенностью с помощью планирования в экономической сфере имеют ряд ограничений, которые характерны и для имитационного моделирования. Эти ограничения обобщены в данной статье в форме рамок.

3. Сложность и доступность вычислительных ресурсов составляет рамку 1.

4. Нелинейность процессов и наличие «черных лебедей» составляют рамку 2. Внутри данной рамки имитационное моделирование позволяет описывать сложные системы, анализировать воздействия и эффекты с учетом неопределенности.

5. Когнитивные искажения при создании моделей и формировании исходных данных экспертным путем составляют рамку 3. Внутри данной рамки имитационное моделирование позволяет снижать влияние человеческого фактора при помощи формализации принимаемого решения, использования групповой экспертизы и включения неопределенности в форме интервальных экспертных оценок, что способствует повышению качества решений. Однако, интервальные экспертные оценки по своей природе имеют ряд ограничений, которые необходимо учитывать.

6. Возможности для верификации модели описаны в виде рамки 4. При однократном плановом принятии решения, насколько бы выверенным оно ни было неизбежны отклонения на протяжении его реализации. Итерационный подход в управлении применим и к процессу моделирования. Он позволяет скорректировать решение, однако требует значительных организационных усилий.

7. Для обеспечения соблюдения принципов ответственного моделирования, аналитик должен учитывать ограничения, накладываемые каждой из описанных рамок.

### **Литература**

1. Девятков Т.В., Минниханов Р.Р., Шестюк В.М. Практическое применение имитационного моделирования // Имитационное моделирование. Теория и практика:

Сборник докладов десятой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2021. СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2021. С. 11–22.

2. Шаститко Д.В., Новыш Б.В. Многокритериальный анализ портфеля инвестиционных проектов на базе интервальных экспертных оценок // Имитационное моделирование. Теория и практика: сборник докладов шестой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2013. Казань: ФЭН, 2013. С. 297–300.

3. Новыш Б.В., Гринберг А.С., Гваева И.В., Шаститко Д.В. Образовательные технологии анализа проблемных ситуаций на базе имитационных моделей // Науч. труды Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь. Минск, 2009. Вып. 11, ч. II. С. 52–66.

4. Талёб Н.Н. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. 2-е изд. доп. М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2021. 736 с.

5. Талёб Н. Н. Антихрупкость. Как извлечь выгоду из хаоса. Пер. с англ. М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2019. 768 с.

6. Balci. O. Verification, validation and accreditation of simulation models // Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, P. 135–141.

7. Ариели Д. Предсказуемая иррациональность. Скрытые силы, определяющие наши решения. М.: Альпина паблишер, 2019. 335 с.

8. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М.: АСТ, 2016. 653 с.

9. Thesen A., Travis L.E. Simulation for Decision Making. An Introduction // Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference. P. 9–18.

10. Хаббард Д. Как измерить все, что угодно. Оценка стоимости нематериального в бизнесе. М.: Олимп-Бизнес, 2011. 298 с.

11. James T. Sawyer, David M. Brann. How to build better models: applying agile techniques to simulation // Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. P. 655–662.

12. Малыханов А.А., Черненко В.Е. Тестирование имитационных моделей // Имитационное моделирование. Теория и практика: сборник докладов десятой всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2021. СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2021. С. 11–22.