

# Комплексное применение моделей системной динамики и агентного моделирования для принятия управленческих решений при внедрении инновационной технологии

Д. А. Клавсуц

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)

*Аннотация:* В работе предложен новый методический подход, направленный на развитие имитационных моделей системной динамики и агентного моделирования в условиях, когда предприятие внедряет инновационную запатентованную технологию на новых рынках, что требует разработки новых бизнес-моделей, стратегий, коммуникационных процессов. Действующие модели решения этих задач реализованы в системе имитационного моделирования AnyLogic.

*Ключевые слова:* инновационная технология управления качеством потребляемой электроэнергии, управленческие решения, долгосрочное прогнозирование, стратегическое планирование, имитационное моделирование рынка инновационных технологий, системная динамика, агентное моделирование.

*Для цитирования:* Клавсуц Д. А. Комплексное применение моделей системной динамики и агентного моделирования для принятия управленческих решений при внедрении инновационной технологии // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 2. С. 22–36. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-2-22-36>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Клавсуц Д. А., 2023

Статья поступила в редакцию 18.12.2022;  
переработанный вариант – 04.02.2023;  
принята к публикации 16.02.2023.

## 1. Введение

Одной из важнейших задач, возникающих при внедрении инновационных технологий, является разработка эффективных стратегических управленческих решений, позволяющих повысить точность и качество планирования инвестиций для управления производством на основе долгосрочного прогнозирования поведения рынка потенциальных пользователей этих технологий.

Объектом эмпирического исследования в работе является отечественное научно-производственное предприятие г. Новосибирска, занимающееся разработкой, производством и внедрением актуальной в мире высокотехнологичной электротехнической продукции. Производимые предприятием устройства – нормализаторы электроэнергии – являются инновационной запатентованной в 38 странах технологией управления качеством потребляемой электроэнергии. Устройства являются технологическим элементом и основным инструментом как традиционных, так и современных интеллектуальных электрических сетей. Применение устройств актуально для всех потребителей электрической энергии на уровне 0.4 кВ, приобретающих электрическую энергию (мощность) для собственных бытовых и производ-

ственных нужд: зданий, сооружений, промышленного оборудования, уличного освещения от одной единицы электрооборудования до комплекса зданий как на действующих, так и на строящихся объектах. При подключении устройств к электрическим сетям на стороне конечных потребителей улучшаются стандартизированные параметры качества и регулируется потребление электроэнергии, что позволяет существенно экономить все энергоресурсы в электроэнергетических системах любой страны мира [1–8].

Практические задачи научно-производственного предприятия по планированию инвестиций, как и многих других подобных, ставят управленческие проблемы и вопросы, требующие проведения научных исследований. В работе исследованы модели внедрения инновационной технологии управления качеством потребляемой электроэнергии в сегментах средних и малых предприятий города Новосибирска, РФ.

Автором разработаны имитационные модели прогнозирования поведения рынка инновационных технологий, основанные на концепции Ф. Басса [9] о разделении агентов рынка на инноваторов и имитаторов, которые функционируют под действием разных тенденций, имеющих существенное значение для продвижения инновационной технологии. Знание этих тенденций и регулируемых параметров позволяет их идентифицировать и эффективно управлять долгосрочным процессом внедрения инновационной технологии. Исследованы и реализованы две парадигмы имитационного моделирования: системная динамика [10] и агентный подход [11, 12]. Проведено их сравнение, показано, что они дают близкие результаты, что позволяет повысить обоснованность принимаемых решений. Простейшая действующая модель этой задачи реализована и доступна для исследований в системе имитационного моделирования AnyLogic [13–14].

Известно, что применение модели Ф. Басса для нескольких рынков мало изучено и исследовано на практике. В работе предложен новый методический подход к развитию этой модели в условиях, когда исследуемое инновационное предприятие выходит на несколько новых сегментов рынка. Выдвигаются и исследуются гипотезы о возникновении и значимом развитии коммуникаций между различными рыночными сегментами. Информация о динамике распространения инновационной технологии в одном из сегментов может влиять на поведение агентов в другом сегменте, и наоборот. Введение таких связей в разработанные автором имитационные модели происходит естественно и технически просто, однако их использование требует дополнительных исследований. Массовые имитационные прогоны разрабатываемых моделей с введением новых рыночных связей и параметров позволяют точнее понять механизмы поведения рынка инновационной запатентованной технологии, использовать эти механизмы для развития моделей, строить обоснованные долгосрочные прогнозы, разрабатывать реалистичные производственные планы, повысить эффективность управления внедрением инновационных технологий.

В разделах 2 – 3 рассматривается традиционный вариант по моделированию внедрения инновационной технологии. Предполагается, что рынки изолированы, не взаимодействуют между собой, хотя они могут внедрять схожие виды инновационной продукции. Для каждого рынка разрабатывается свой независимый проект. Причем проекты, как правило, выполняются последовательно. Исторически это оправдано. Действительно, молодые, бурно развивающиеся инновационные предприятия, как правило, начинают с небольших рынков или рыночных сегментов. И только после освоения нескольких сегментов, наработки опыта могут ставить задачу принципиального роста масштаба.

В разделе 2 исследуется простая системно-динамическая модель на примере внедрения инновационной технологии на изолированных сегментах рынка г. Новосибирска – средних и малых предприятиях. Модель подробно описывается, интерпретируются полученные результаты.

В разделе 3 исследуется агентная модель внедрения инновационной технологии на примере тех же изолированных сегментов рынка г. Новосибирска – средних и малых предприятиях. Описывается диаграмма состояний модели, показано, что полученные результаты сов-

падают с результатами системно-динамической модели, что повышает обоснованность решений.

В разделе 4 ставится новая важная для научно-производственного предприятия задача о выводе инновационной технологии сразу на несколько рынков (или рыночных сегментов) в рамках единого более масштабного проекта. Это позволяет перевести проекты на качественно новый уровень: получить эффект за счет масштаба производства, эффективного распределения ресурсов, сокращения затрат на продвижение и сопровождение внедрения технологии. Выдвигаются и исследуются гипотезы о существовании и развитии коммуникаций между рыночными сегментами и, в частности, о взаимном влиянии информации на различных сегментах рынка о распространении инновационной технологии.

Разработана имитационная системно-динамическая модель внедрения инновационной технологии совместно на нескольких сегментах рынка, в которую введены новые связи, соответствующие выдвинутым гипотезам. Представлен вариант совместной модели внедрения инновационной технологии для двух исследованных ранее сегментов рынка – средних и малых предприятий г. Новосибирска. Приведены результаты моделирования, на основе которых сформулированы управленческие решения по планированию производства инновационного предприятия. Даны рекомендации по разработке аналогичной агентной модели.

В заключении приводятся выводы о результатах работы, сформулированы управленческие решения по внедрению инновационной технологии на группы рыночных сегментов, особенности и ограничения модели Басса, ее реализации в AnyLogic, рекомендации по их использованию.

## 2. Модель системной динамики внедрения на изолированном рынке

Традиционные примеры реализации модели Ф. Басса распространения инноваций описывают поведение только одного рынка, причем розничного [9]. Распространение рассматриваемой в данной работе инновационной технологии управления качеством потребления электроэнергии происходит на нескольких различных рынках, на территориях, где технология защищена патентами (Россия, страны Евросоюза, Северной Америки, ЕАЭС), а также сегментов отдельных рынков (предприятия государственного и частного сектора, предприятия разных отраслей, предприятия средние, малые и т.п.). В данной работе рассматривается новосибирский рынок потенциальных потребителей инновационной технологии. На рынке могут присутствовать как розничные потребители, так и оптовые, причем разного уровня. Среди оптовых потребителей важное место занимают сегменты средних и малых предприятий. В качестве других сегментов могут также выступать потребители электрической энергии крупного бизнеса, разных отраслей и т.д.

В работе исследования проводятся в сегментах средних и малых предприятий. На настоящий момент в г. Новосибирске в качестве потенциальных клиентов инновационной технологии могут выступать до 5 тысяч малых и до 300 средних предприятий [оценка на основе источника: Малое и среднее предпринимательство Новосибирска <http://www.mispnsk.ru>].

Концепция системной динамики носит «централизованный» характер. При этом предполагаются известными общие закономерности поведения системы. Важной является структура различного типа связей и элементов модели – накопителей, потоков, факторов, параметров, переменных. Связи определяют динамику поведения всей системы, что позволяет прогнозировать её развитие. Причем даже для инновационных технологий, когда ещё нет или недостаточно ретроспективных данных.

Рассмотрим сначала применение для каждого отдельного сектора (средних и малых предприятий) простейшей модели системной динамики, ориентированной на типовые рынки, представленной разработчиками AnyLogic [13]. Традиционная модель системной динамики показана на рис. 1.

Обозначения модели на рис. 1:

PotentialAdopters – накопитель. Общее число потенциальных пользователей в текущий момент модельного времени. Начальное значение задаётся параметром TotalPopulation.

Adopters – накопитель. Число пользователей, установивших нормализаторы в текущий момент модельного времени. В начале эксперимента это число равно нулю: накопитель пуст.

TotalPopulation – параметр. Общее количество потенциальных пользователей инновационной технологии.

AdoptionRate – поток (скорость) внедрения инновационной технологии.

Market Saturation – отрицательная балансирующая (уравновешивающая, самокорректирующаяся) обратная связь. Результат прямого влияния продуктов маркетинга и рекламы на потенциальных пользователей инновационной технологии.

AdoptionFromAd – динамическая переменная. Фактор. Маркетинговые мероприятия.

AdEffectiveness – параметр. Эффективность маркетинговых мероприятий.

Word of Mouth – усиливающая обратная связь. Внедрение под влиянием «сарафанного радио».

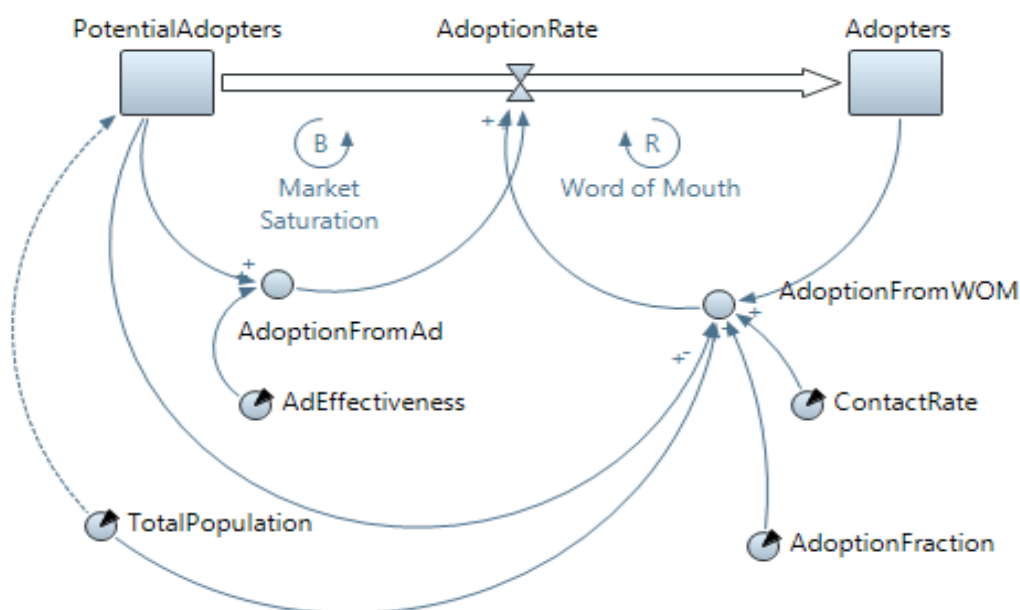


Рис. 1. Традиционная модель системной динамики

AdoptionFromWOM – динамическая переменная. Фактор. «Сарафанное радио».

ContactRate – параметр. Частота контактов в год потенциальных пользователей.

AdoptionFraction – параметр. Сила убеждения клиента, внедрившего инновационную технологию, влияние на фактор «сарафанное радио».

В представленной модели связь между накопителями – это поток внедрения инновационной технологии (устройств – нормализаторов) AdoptionRate, преобразующий потенциальных пользователей PotentialAdopters в пользователей инновационной технологии Adopters. Факторами, влияющими на накопители и поток, в представленной модели выбраны система направленного информационного влияния – AdoptionFromAd и внутрирыночные коммуникации – AdoptionFromWOM.

Регулируемым параметром для фактора AdoptionFromAd является её эффективность – AdEffectiveness (по рекомендации разработчиков принят типовой уровень 0.011), а для фактора внутрирыночных коммуникаций AdoptionFromWOM – численность популяции TotalPopulation (300 средних и 5 тысяч малых предприятий), частота контактов ContactRate, (в рассматриваемом примере 100 контактов в год среди участников Word of Mouth – «сарафанного радио», когда информация об инновационной технологии получена из уст как по-

тенциальных пользователей, так и пользователей инновационной технологии) и сила убеждения AdoptionFraction (0.015).

Первая обратная связь Market Saturation в модели – отрицательная, уравнивающая, самокорректирующаяся. Усиление фактора AdoptionFromAd увеличивает число Adopters и уменьшает число потенциальных пользователей PotentialAdopters. Это ограничивает рост фактора и приводит к его снижению. Вторая обратная связь в модели так же уравнивающая: увеличение Adopters под влиянием внутрикластерных коммуникаций AdoptionFromWOM увеличивает число Adopters и уменьшает число PotentialAdopters. Это также ограничивает рост фактора AdoptionFromWOM и приводит к его снижению. Третья обратная связь в модели – положительная, усиливающая. Увеличение внедрений нормализаторов под влиянием AdoptionFromWOM увеличивает число Adopters. Это приводит к еще большему росту AdoptionRate под влиянием AdoptionFromWOM и к падению со временем доли влияния системы направленного информационного влияния на поток AdoptionRate.

Поток внедрений устройств – нормализаторов AdoptionRate задается как производная по времени PotentialAdopters со знаком минус и Adopters со знаком плюс, как в выражении:

$$\begin{aligned}\frac{d(\text{PotentialAdopters})}{dt} &= -\text{AdoptionRate}, \\ \frac{d(\text{Adopters})}{dt} &= \text{AdoptionRate}.\end{aligned}\tag{1}$$

Модель предполагает следующие допущения:

1. Система направленного информационного влияния и внутрирыночные коммуникации влияют на поток AdoptionRate аддитивно и с одинаковым весом, как представлено в выражении:

$$\text{AdoptionRate} = \text{AdoptionFromAd} + \text{AdoptionFromWOM}.\tag{2}$$

2. Поток внедрений устройств – нормализаторов под влиянием системы направленного информационного влияния – это произведение параметров эффективности системы направленного информационного влияния и количества потенциальных потребителей, как представлено в выражении:

$$\text{AdoptionFromAd} = \text{AdEffectiveness} \times \text{PotentialAdopters}.\tag{3}$$

3. Поток внедрений устройств – нормализаторов под влиянием внутрикластерных коммуникаций AdoptionFromWOM – это произведение количества внедривших Adopters, количества контактов ContactRate, силы убеждения AdoptionFraction и доли PotentialAdopters в популяции TotalPopulation, как представлено в выражении:

$$\begin{aligned}\text{AdoptionFromIC} &= \text{Adopters} \times \text{ContactRate} \times \text{AdoptionFraction} \times \frac{\text{PotentialAdopters}}{\text{TotalPopulation}} \text{Adoption-} \\ \text{FromWOM} &= \text{Adopters} \times \text{ContactRate} \times \text{AdoptionFraction} \times \\ &\quad \times \text{PotentialAdopters} / \text{TotalPopulation}.\end{aligned}\tag{4}$$

Все приведённые формулы (1) – (4) используются в AnyLogic при формировании модели системной динамики, представленной на рис. 1.

Исходные данные для моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные для моделирования внедрения инновационной технологии на рынке г. Новосибирска

| Сектор рынка        | TotalPopulation | AdEffectiveness | ContactRate | AdoptionFraction |
|---------------------|-----------------|-----------------|-------------|------------------|
| Средние предприятия | 300             | 0.011           | 100 в год   | 0.015            |
| Малые предприятия   | 5000            | 0.011           | 100 в год   | 0.015            |

Текущие мгновенные результаты эксперимента непрерывно отображаются на всех элементах модели системной динамики, что неудобно представить в печатном виде на статическом рис. 1. Поэтому в модели есть возможность формировать динамически меняющиеся графики внедрения инновационной технологии.

На левом графике рис. 2. представлена динамика внедрения инновационной технологии в г. Новосибирске в рыночном сегменте средних предприятий на момент окончания эксперимента. На правом графике рис. 2 представлена динамика результатов моделирования внедрения инновационной технологии в сегменте малых предприятий.

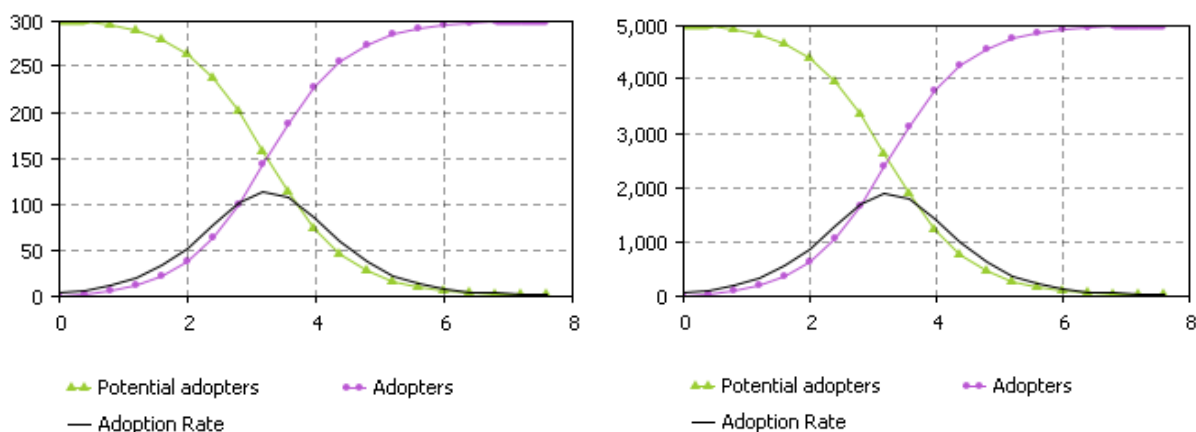


Рис. 2. Результаты системно-динамического моделирования внедрения инновационной технологии в сегментах рынка средних (левый график) и малых (правый график) предприятий

На рис. 2 видно, что число Adopters (внедривших инновационную технологию) в обоих сегментах растет от нуля в момент старта проекта до максимума (TotalPopulation) к концу восьмого года. Кривая роста имеет симметричный относительно точки перегиба S-образный вид. Число PotentialAdopters, наоборот, падает от максимума (TotalPopulation) до нуля к концу восьмого года. Поток внедрения AdoptionRate имеет колоколообразный вид и достигает максимума в момент времени, соответствующий точке перегиба S-образных кривых PotentialAdopters и Adopters. Для производителя это означает, что если, например, он планирует в основном обеспечить инновационным устройством сектор рынка примерно за 8 лет, как в показанном примере, то при выбранных параметрах модели его производственная программа должна соответствовать показанным на рис. 2 кривым. Причем пик внедрения инновационной технологии (устройств – нормализаторов) в обоих сегментах следует ожидать к началу четвертого года проекта (максимум кривой AdoptionRate), и производство должно быть к этому готово.

Главная задача при работе с подобными моделями – измерить и задать фактические рыночные параметры, представленные в табл. 1.

Эксперименты с моделью дают возможность разрабатывать более обоснованные производственные решения, повышая их эффективность. Предприятие – производитель инновационного продукта может увеличивать емкость рынка за счет, например, выпуска устройств, настроенных на конкретного клиента, постоянных внедрений модифицированных устройств,

соответствующих развитию как традиционных, так и современных интеллектуальных электрических сетей, позволяющих повысить эффективность управления качеством потребления электроэнергии. Кроме того, предприятие – производитель инновационного продукта может использовать коммуникации, возникающие между отдельными рынками и секторами рынков. Этот подход будет рассмотрен в данной работе.

### 3. Агентная модель внедрения на изолированном рынке

В этом разделе на примере рассмотренной задачи внедрения инновационной технологии обсудим методические основы агентного подхода, альтернативные системной динамике. Агент – это сущность, которая обладает активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими агентами, а также может изменяться (эволюционировать) [15]. Концепция агентного подхода, в отличие от системной динамики, носит «децентрализованный» характер, когда неизвестны общие закономерности системы, но известны правила поведения каждого отдельного элемента (агента), в нашем случае предприятия, внедряющего у себя инновационную технологию. Взаимодействия таких агентов и определяют закономерности поведения всей системы, что позволяет строить достоверные прогнозы и проводить обоснованное планирование [16]. Цель агентных моделей – получить представление о глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе [17].

AnyLogic предоставляет для разработки агентных моделей набор средств визуальной графической разработки: стейтчарты, события, таймеры, синхронное и асинхронное планирование событий.

Если системно-динамические и агентные имитационные модели адекватно описывают систему, то можно ожидать, что они дадут близкие результаты прогнозов. И наоборот, близость результатов моделирования, полученных с помощью разных подходов, может выступать критерием адекватности моделей. Это утверждение и определяет концепцию данной работы.

На рис. 3 показана диаграмма состояний – основная часть агентной модели диффузии Ф. Басса. Модель представлена разработчиками AnyLogic PLE и называется Bass Diffusion Agent Based.

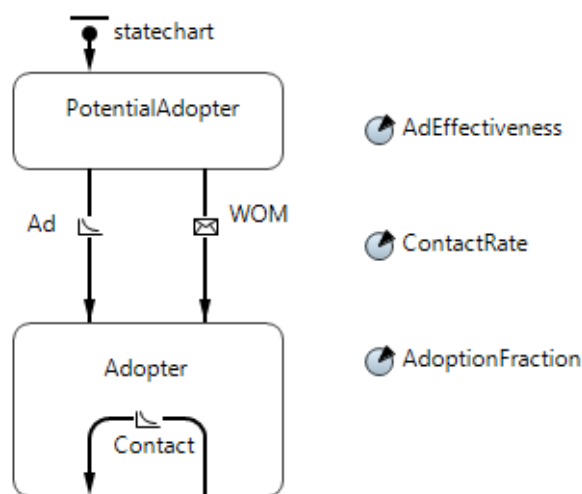


Рис. 3. Диаграмма состояний агентной модели внедрения инновационной технологии на изолированном рынке

Агент в описываемой автором системе – это потребитель инновационной технологии. Диаграмма состояний описывает поведение каждого отдельного потребителя рынка. Прямо-

угольники описывают состояния потребителя. Их в модели два: PotentialAdopter и Adopter. Это напоминает накопители в системной динамике. Но смысл они имеют другой. В системной динамике названия накопителей имели множественное число (PotentialAdopters и Adopters), другую размерность – количество предприятий. А здесь это состояния потребителя. Именем Statechart названо начало диаграммы состояний. Оно направлено в состояние PotentialAdopter. Поэтому состояние PotentialAdopter – начальное. Это состояние диаграммы означает, что потребитель еще не приобрел технологию. Состояние Adopter должно становится активным в момент приобретения агентом технологии.

Время, необходимое для принятия решения о приобретении технологии, экспоненциально зависит от подверженности агента влиянию маркетинговых мероприятий. Поэтому переход, представленный стрелкой Ad (влияние маркетинговых мероприятий), в системе задается свойством «Происходит с заданной интенсивностью». Интенсивность этого перехода задается параметром AdEffectiveness (верхний параметр на рис. 3).

Переход WOM (влияние общения) задается свойством «Происходит при получении сообщения». Сообщение в этом примере задается строкой «Buy!» (на диаграмме состояний не показывается).

Еще один переход, представленный стрелкой Contact, задается свойством «Происходит с заданной интенсивностью». Интенсивность этого перехода задается произведением параметров  $ContactRate * AdoptionFraction$  (средний и нижний параметры на рис. 3). Действие перехода задается выражением (на диаграмме состояний не показывается) «send («Buy!», RANDOM\_CONNECTED)». То есть случайно формируется сообщение «Buy!» для запуска перехода WOM. Так работает агентная модель Басса.

Представление (презентация) выполнения имитационной агентной модели может иметь различный дизайн. Один из вариантов приведен на рис. 4.

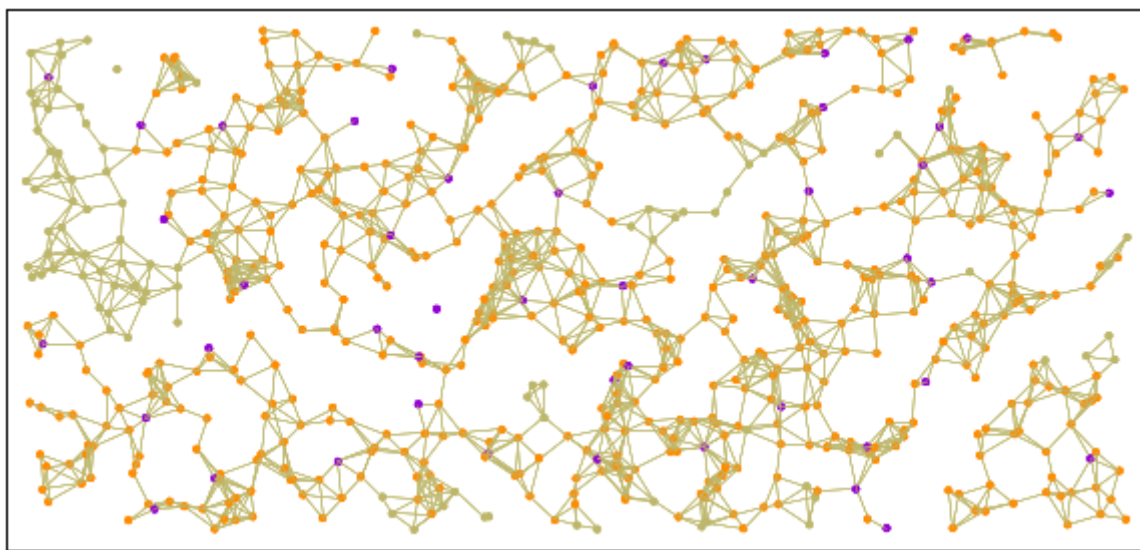


Рис. 4. Презентация мгновенного состояния агентной модели внедрения инновационной технологии на изолированном рынке

В данном случае состояния и связи агентов показаны точками и линиями в непрерывном двухмерном пространстве. Цвета точек показывают, под влиянием чего произошло приобретение технологии – маркетинговых мероприятий или «сарафанного радио». Линиями показаны агенты, между которыми происходил обмен информацией. Фиолетовыми точками обозначены предприятия-инноваторы, внедрившие (приобретшие) инновационный продукт на основе исключительно маркетинговых мероприятий, при этом, одна фиолетовая точка без линий связи (в центральной части рисунка) – предприятие-инноватор, внедрившее (приобретшее) инновационный продукт, но не имевшее контактов с другими предприятиями, т.е. не участвующее в процессе продвижения инновационной технологии на основе «сарафанного

радио». Желтыми точками обозначены предприятия, внедрившие инновационную технологию и передавшие информацию другим потенциальным покупателям под влиянием «сарафанного радио». Серыми точками обозначены предприятия, от которых исходила информация, и те, которые внедри (приобрели) инновационную технологию и передали информацию другим предприятиям.

Основным результатом имитации агентной модели являются графики кривых распространения инновационной технологии, представленные на рис. 5.

Эти графики получены для тех же изолированных сегментов рынка – средних и малых предприятий, внедряющих инновационную технологию, с теми же параметрами, которые задавались в табл. 1 для системной динамики. Для нас важно, что агентный подход дает точно такие же результаты, что и системная динамика. График внедрения, полученный по агентной модели, совпадает с графиком на рис. 3.

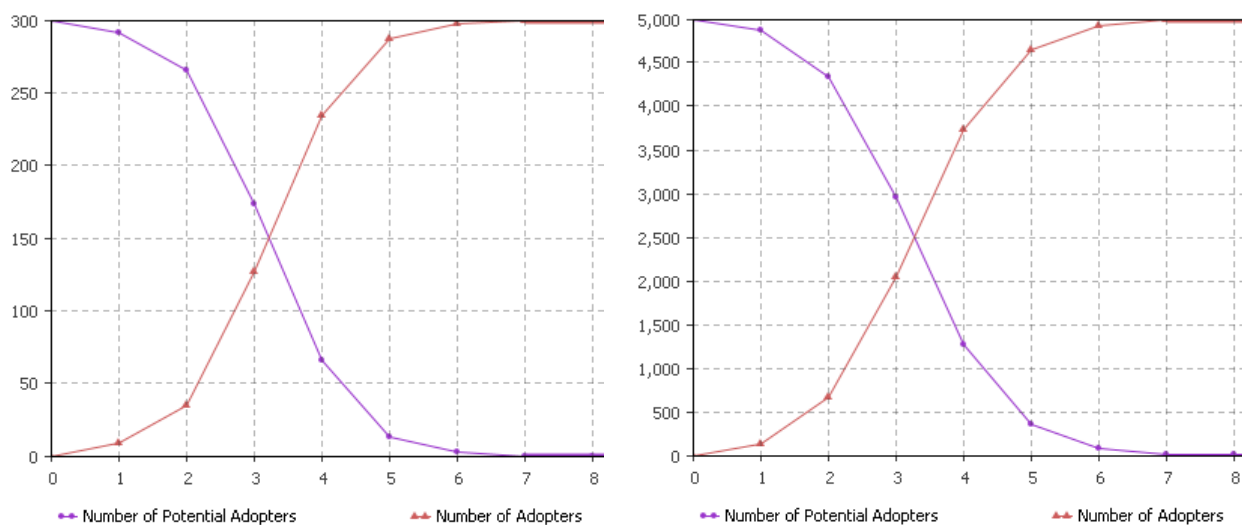


Рис. 5. Результаты агентного моделирования внедрения инновационной технологии в изолированных сегментах рынка средних (левый график) и малых (правый график) предприятий

Агентные модели наглядны. Можно на экране компьютера наблюдать в модельном времени переход потребителей из обычного состояния в состояние внедрения инновационной технологии. Трехмерная анимация, привязка к конкретным картам регионов на графических информационных системах (ГИС) дает дополнительные возможности для моделирования.

#### 4. Модель внедрения на связанных рынках

В данном разделе модель Ф. Басса дополняется предположением о существовании и значимом развитии коммуникаций между рынками и рыночными сегментами. Это дополнение совершенно естественно для малых и средних предприятий, приобретающих инновационные устройства. Информация о динамике распространения инновационной технологии в одном из сегментов может быть использована и влиять на поведение агентов в другом сегменте, и наоборот. При этом открываются новые возможности управления внедрением инновационной технологии. Введение таких связей в разрабатываемые имитационные модели требует дополнительных исследований.

Итак, предположим, что сегменты предприятий г. Новосибирска имеют информационные связи. Например, через сайт завода-производителя, на котором разработчик инновационной технологии решил оперативно публиковать статистику её внедрения. Эта информация служит основанием для появления коммуникаций между сегментами рынка, что должно влиять на поведение рынка в целом. Назовем такой рынок связанным и построим модель связанного рынка.

Подробно остановимся на системно-динамической модели. Это оправданно, поскольку в разделе 3 было показано, что системно-динамические и агентные реализации модели Ф. Басса для изолированных рынков дают одинаковые результаты.

Для упрощения рассмотрим связанный рынок только двух сегментов, определенных в начале работы: средних и малых предприятий г. Новосибирска. Такая модель представлена на рис. 6.

Модель на рис. 6 состоит из двух элементов традиционной модели системной динамики, представленной на рис. 1, дополненных новыми связями между ними. Верхняя часть модели представляет сегмент средних предприятий, а нижняя часть – малых предприятий. Все обозначения сегментов соответствуют обозначениям на рис. 1, но с индексами 1 и 2 соответственно. В описываемом эксперименте все параметры модели соответствуют табл. 1. То есть в сегментах различаются только значения параметров TotalPopulation1 (300 средних предприятий) и TotalPopulation2 (5000 малых предприятий).

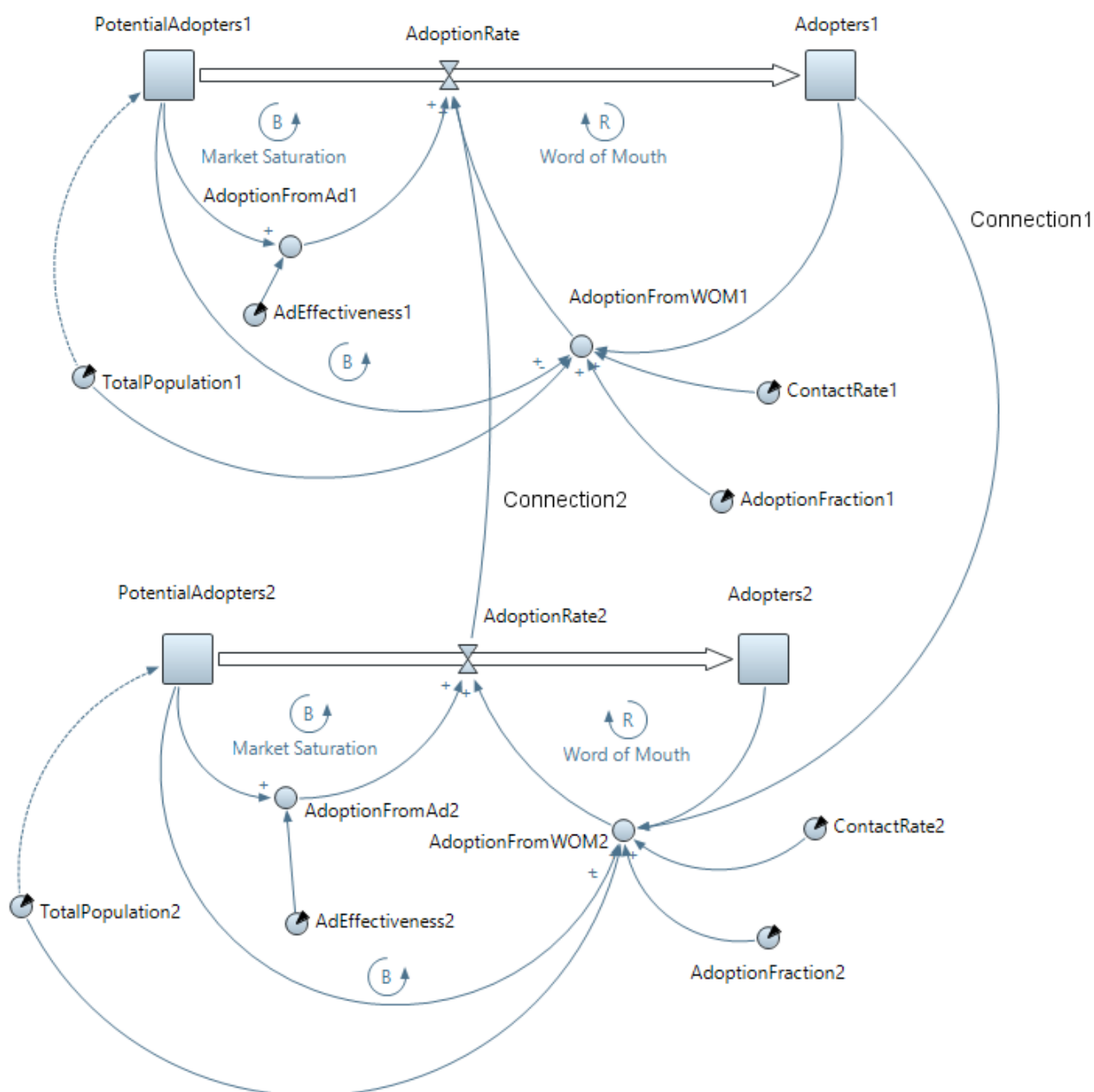


Рис. 6. Модель системной динамики внедрения инновационной технологии на связанный рынок двух сегментов средних (1) и малых (2) предприятий

Новая связь Connection1 реализует гипотезу о том, что число средних предприятий Adopters1, внедривших технологию, становится известным в сегменте малых предприятий и усиливает фактор продаж в этом сегменте под влиянием «сарафанного радио» Adoption-FromWOM. Связь Connection2 реализует гипотезу о том, что поток внедрения AdoptionRate2 в сегменте малых предприятий становится известным в сегменте средних предприятий и усиливает поток внедрения AdoptionRate1.

Результаты моделирования внедрения инновационной технологии управления качеством потребляемой электроэнергии одновременно в двух сегментах (средних и малых предприятий) показаны на рис. 7.

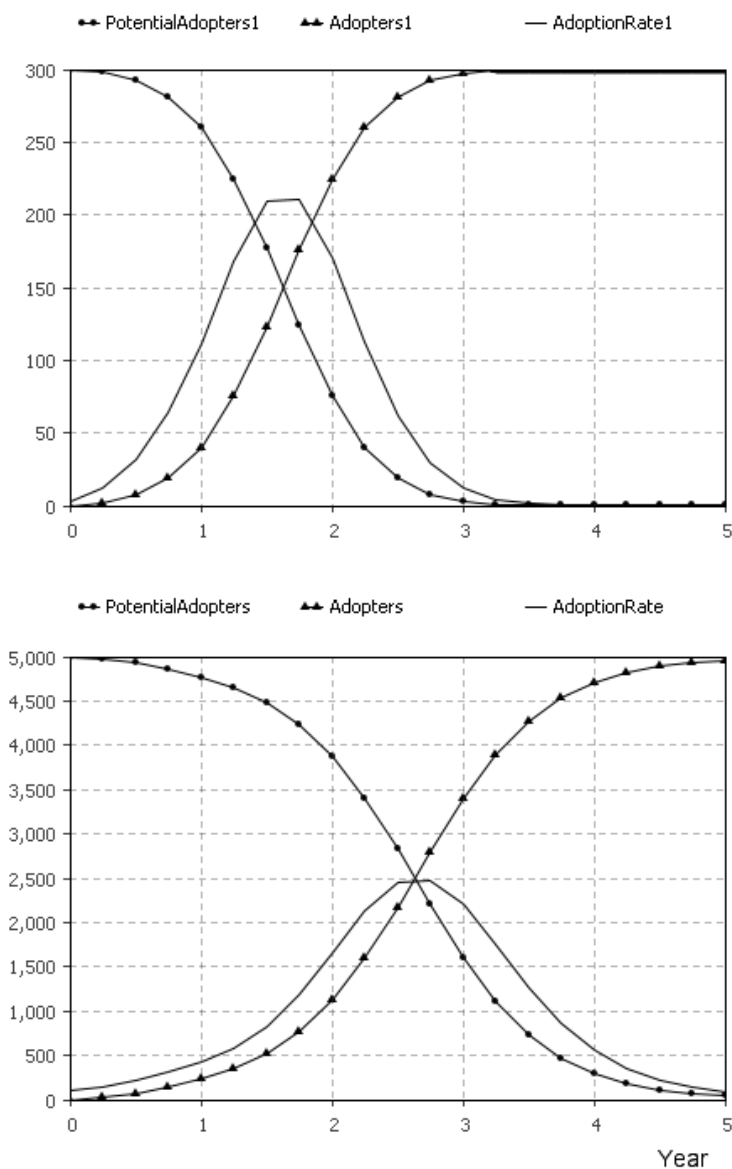


Рис. 7. Результаты моделирования внедрения инновационной технологии одновременно в двух сегментах рынка средних (верхний график) и малых (нижний график) предприятий

На верхнем графике рис. 7 представлен прогноз динамики внедрения инновационной технологии управления потреблением электроэнергии в сегменте средних предприятий, на нижнем – в сегменте малых предприятий г. Новосибирска. В результате внедрение инновационной технологии управления потреблением электроэнергии в сегменте малых предприятий стимулирует внедрение этой технологии в сегменте средних предприятий. Поэтому пик внедрения в сегменте 1 наступает раньше: не к середине третьего года, а к концу второго года проекта (верхний график на рис. 7). С другой стороны, при ограниченных ресурсах произ-

водства рост внедрений инновационной технологии в сегменте средних предприятий может отрицательно отразиться на потоке внедрений в сегменте малых предприятий. Поэтому пик внедрения инновационной технологии в сегменте 2 наступает позже: не к середине третьего года, а к началу четвертого года проекта (верхний график на рис. 7).

В этом разделе для упрощения визуального восприятия был представлен рынок внедрения инновационной технологии, состоящий из минимального количества сегментов. Кроме того, показано минимальное количество новых внутрирыночных и межрыночных связей. Очевидно, что приведенные модели могут быть расширены и адаптированы под другие конкретные рынки на основе изложенной методики.

## 5. Заключение

Проведено исследование комплексного применения моделей системной динамики и агентного моделирования, направленное на повышение точности и качества принятия управленческих решений при стратегическом планировании внедрения инновационной запатентованной технологии управления качеством потребляемой электроэнергии на основе долгосрочного прогнозирования поведения рынка потенциальных пользователей этой технологии.

Исследованы имитационные модели прогнозирования поведения рынка инновационной технологии, основанные на концепции Ф. Басса о разделении агентов рынка на инноваторов и имитаторов, которые функционируют под действием разных факторов. Знание этих факторов и регулируемых параметров позволяет их идентифицировать и эффективно управлять долгосрочным процессом внедрения.

Исследованы и реализованы две парадигмы имитационного моделирования: системная динамика и агентный подход. Проведено их сравнение, показано, что они дают близкие результаты, что позволяет повысить обоснованность принимаемых управленческих решений.

Показана важность и сложность задач измерения и регулирования рыночных параметров, используемых в имитационных моделях, решение которых реализовано в системе AnyLogic.

Особенностью работы и развитием известных моделей является предложенный автором новый методический подход о выводе инновационной технологии сразу одновременно на несколько рынков (или рыночных сегментов) в рамках единого более масштабного проекта, что позволяет перевести проекты на качественно новый уровень. В работе выдвигаются и исследуются гипотезы о возникновении и значимом развитии коммуникаций между рыночными сегментами. Информация о динамике распространения инновационной технологии в одном из сегментов может влиять на поведение агентов в другом сегменте, и наоборот. Введение таких связей в разрабатываемые имитационные модели происходит естественно и технически просто, однако их использование требует дополнительных исследований.

Представленные имитационные модели для принятия управленческих решений по внедрению инновационной технологии можно развивать далее.

## Литература

1. *Klavsuts D. A., Klavsuts I. L., Rusin G. L.* Aspects of Evaluating the Efficiency of Introducing Innovative Method and Technology Demand Side Management in Smart Grid System // Proc. 48th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin Institute of Technology, Ireland, 2–5 Sept., 2013.
2. *Klavsuts I. L., Klavsuts D. A., Rusin G. L., Mezhev I. S* Perfecting business processes in electricity grids by the use of innovative technology of demand side management in the framework of the general conception of smart grids // Proc. 49th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Romania, Cluj-Napoca, 2–5 Sept. 2014.

3. *Klavsutis D. A., Klavsutis I. L., Avdeenko T. V.* Providing the quality of electric power by means of regulating customers' voltage // Proc. 49th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Romania, Cluj-Napoca, 2–5 Sept. 2014.
4. *Клавсуц И. Л., Русин Г. Л., Клавсуц Д. А.* Управление внедрением инновационной энерго-сберегающей технологии в старопромышленных регионах СНГ и в Северо-Восточных Азиатских регионах: опыт и перспективы // Сборник научных статей «Модернизация российской экономики: перспективы, парадигмы, решения». 2014. С. 40–47, <http://elibrary.ru/item.asp?id=23814265>.
5. *Klavsutis I. L., Klavsutis D. A., Rusina A. G., Rusin G. L.* Modes control of Smart Power Grids based on the usage of the innovative method and device of Demand Side Management // Proc. 50th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), UK, Stoke-on-Trent, 1–4 Sept. 2015. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339779.
6. *Клавсуц И. Л., Русин Г. Л., Хайруллина М. В.* Стратегические модели внедрения инновационной технологии управления потреблением электроэнергии на мировые рынки // Сборник трудов МНТК «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП), Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. Т. 11. С. 94–101. ISBN 978-5-7782-2991-4; 978-5-7782-3002-6.
7. *Klavsutis I. L., Rusina A. G., Klavsutis D. A.* The development of simulation model of innovative technology of AC voltage normalization for introduction into smart grid system // Proc. 51th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Portugal, Coimbra, 6–9 Sept. 2016.
8. *Fishov A. G., Klavsutis I. L., Karjaubayev N. A., Klavsutis D. A.* Decentralized smart multi-agent voltage regulation in electric grids. Ideology and modeling // Proc. 53th IEEE International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), UK, Glasgow, 4–7 Sept. 2018.
9. *Bass F. M.* A new product growth for model consumer durables // Management Science. 1969. V. 15, № 5. P. 215–227.
10. *Форрестер Дж.* Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Под общ. ред. Д. М. Гвишиани. М.: Прогресс, 1969. 340 с.
11. *Brailsford S., Churilov L., and Dangerfield B.* Front Matter, in Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. DOI: 10.1002/9781118762745.
12. *Jones L.* Vensim and the development of system dynamics, in Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. DOI: 10.1002/9781118762745.ch11.
13. AnyLogic. Многоподходное имитационное моделирование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.com/> (дата обращения: 02.11.2022).
14. *Borshchev A.* Multi-method modelling: AnyLogic, in Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. DOI: 10.1002/9781118762745.ch12.
15. *Romanowska I., Wren C. D., Crabtree S. A.* Agent-Based Modeling for Archaeology: Simulating the Complexity of Societies. SFI PRSS, 2021. 442 p. ISBN 978-1947864252.
16. *Railsback S. F., Grimm V.* Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction. Princeton University Press, 2019. 360 p. ISBN 978-0691190839.
17. *Crooks A., Malleson N., Manley E., Heppenstall A.* Agent-Based Modelling and Geographical Information Systems: A Practical Primer (Spatial Analytics and GIS). SAGE Publications Ltd, 2019. 408 p. ISBN 978-1473958654.

**Клавсуц Дмитрий Александрович**

магистр, аспирант кафедры теоретической и прикладной информатики, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, ауд. 201), тел. +7 383 3460 600, e-mail: dklavsuts@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9592-047X.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

**Integrated Usage of System Dynamic Models and Agent-based Modeling for Taking Management Decisions when Introducing Innovative Technology**

Dmitry Klavsuts

Novosibirsk State Technical University (NSTU)

**Abstract:** The paper proposes a new methodological approach aimed at developing simulation models of system dynamics and agent-based modeling in case an enterprise introduces an innovative patented technology in new markets. This task requires development of new business models, strategies, and communication processes. The operating models for solving these problems are implemented in the AnyLogic simulation system

**Keywords:** innovative technology for managing electricity consumption, management decisions, long-term forecasting, strategic planning, simulation of the market for innovative technologies, system dynamics, agent-based modeling.

**For citation:** Klavsuts D. A. Integrated usage of system dynamic models and Agent-based modeling for taking management decisions when introducing innovative technology (in Russian). *The SibSUTIS Bulletin*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 22-36. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-2-22-36>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Klavsuts D. A., 2023

The article was submitted: 18.12.2022;  
revised version: 04.02.2023;  
accepted for publication 16.02.2023.

**References**

1. Klavsuts D. A., Klavsuts I. L., Rusin G. L. Aspects of Evaluating the Efficiency of Introducing Innovative Method and Technology Demand Side Management in Smart Grid System. *48 th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2013*, hosted by Dublin Institute of Technology, Ireland, Section- Smart Grids, 2-5 September, 2013.
2. Klavsuts I. L., Klavsuts D. A., Rusin G. L., Mezhev I. S. Perfecting business processes in electricity grids by the use of innovative technology of demand side management in the framework of the general conception of smart grids. *49 International Universities power engineering conference (UPEC)*, Romania, Cluj-Napoca, 2-5 September, 2014, p. 4.
3. Klavsuts D. A., Klavsuts I. L., Avdeenko T. V. Providing the quality of electric power by means of regulating customers' voltage. *49 International Universities power engineering conference (UPEC)*, Romania, Cluj-Napoca, 2-5 September, 2014, p. 4.
4. Klavsuts I. L., Rusin G. L., Klavsuts D. A. Upravlenie vnedreniem innovatsionnoi energosberegayushchei tekhnologii v staropro-myshlennykh regionakh SNG i v Severo-Vostochnykh Aziatskikh re-

- gionakh: opyt i perspek-tivy [Management of the introduction of innovative energy-saving technology in the old industrial regions of the CIS and in the North-East Asian regions: experience and prospects]. *Modernization of the Russian economy: prospects, paradigms, solutions* - Collection of scientific articles, Novosibirsk, 2014, pp. 40-47.
5. Klavsuts I. L., Klavsuts D. A., Rusina A. G., Rusin G. L. Modes control of Smart Power Grids based on the usage of the innovative method and device of Demand Side Management. *50 International universities power engineering conference (UPEC 2015)*, United Kingdom, Stoke-on-Trent, 1-4 September, 2015, p. 6. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339779.
  6. Klavsuts I. L., Rusin G. L., Khairullina M. V. Strategic models of introducing innovative technology for management of electric power consumption into world markets. *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016)*, 13 intl. sci.-tech. Conf., Novosibirsk, 3-6 October, 2016, Novosibirsk, Publishing house of NSTU, vol 11, pp. 94-101.
  7. Klavsuts I. L., Rusina A. G., Klavsuts D. A. The development of simulation model of innovative technology of AC voltage normalization for introduction into smart grid system. *51 International Universities power engineering conference (UPEC)*, Portugal, Coimbra, 6-9 September, 2016, p. 6.
  8. Fishov A. G., Klavsuts I. L., Karjaubayev N. A., Klavsuts D. A. Decentralized smart multi-agent voltage regulation in electric grids. Ideology and modeling. *Proceeding 53 international universities power engineering conference (UPEC2018)*, United Kingdom, Glasgow, 4-7 September, 2018, p. 6. DOI: 10.1109/UPEC.2018.8542109.
  9. Bass, Frank M. A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, vol. 15, no. 5, January, 1969. pp. 215-227.
  10. Forrester Dzh. Osnovy kibernetiki predpriyatiya (industrial'naya dinamika) [Fundamentals of enterprise cybernetics (industrial dynamics)]. Ed. Gvishiani D.M., Progress, 1969. 340 p.
  11. Brailsford S., Churilov L. and Dangerfield B. (EDS) Front Matter. *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. DOI: 10.1002/9781118762745.
  12. Jones L. Vensim and the development of system dynamics. *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*. Eds. S. Brailsford, L. Churilov and B. Dangerfield. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. doi: 10.1002/9781118762745.
  13. AnyLogic. Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovanie [AnyLogic.Multi-approach simulation], available at: <http://www.anylogic.com>, (accessed 21.11.2022).
  14. Borshchev, A. Multi-method modelling: AnyLogic. *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*. Eds. S. Brailsford, L. Churilov and B. Dangerfield. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2014. doi: 10.1002/9781118762745.
  15. Iza Romanowska, Colin D. Wren, Stefani A. Crabtree *Agent-Based Modeling for Archaeology: Simulating the Complexity of Societies*. SFI PRSS, 2021. 442 p.
  16. Steven F. Railsback, Volker Grimm *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton University Press, 2019. 360 p.
  17. Andrew Crooks, Nick Malleson, Ed Manley, Alison Heppenstall *Agent-Based Modelling and Geographical Information Systems: A Practical Primer (Spatial Analytics and GIS)*, SAGE Publications Ltd, 2019. 408 p.

### Dmitry A. Klavsuts

Graduate student, Department of Theoretical and Applied Computer Science, Novosibirsk State Technical University (NSTU, 20, Karla Marksa ave., Novosibirsk, Russia, 630073), phone: +7 383 3460 600, e-mail: dklavsuts@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9592-047X.