
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 517.97 : 532.526

ISSN 1995-5499

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>

Поступила в редакцию 06.05.2022

Подписана в печать 30.09.2022

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА В МОДЕЛИРОВАНИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2022 М. В. Болсуновская, А. М. Гинцяк, Ж. В. Бурлуцкая, А. А. Петряева,
Д. А. Зубкова✉, М. Б. Успенский, И. А. Селедцова

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, к 11, 195251 Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. Данная работа направлена на подготовку методологической базы для моделирования социально-экономических и социотехнических систем. Рассмотрены виды имитационного моделирования с точки зрения подбора оптимального решения в зависимости от особенностей объекта исследования и цели моделирования. Среди рассмотренных моделей, как инструмент для моделирования социально-экономических и социотехнических систем, наибольшее внимание уделяется гибридным моделям, позволяющим изучить анализируемый объект с разных сторон и на разных уровнях абстракции, комбинируя известные подходы имитационного моделирования. В дополнение, гибридные модели используются во многих сферах, таких как здравоохранение, экономика, экология, маркетинг, промышленные предприятия и производственные системы, что обеспечивает их универсальность, востребованность и эффективность данного подхода. В рамках исследования были проанализированы статьи базы научных публикаций Scopus, посвященные моделированию социально-экономических и социотехнических систем, имитационному моделированию и гибридным моделям. В данной статье рассмотрены базовые парадигмы имитационного моделирования и используемые методы для моделирования социально-экономических и социотехнических систем, произведена классификация по типу модели и гибридации, освещены возможные комбинации типов гибридации и применимость рассмотренных видов. Также выявлена тенденция к использованию гибридного моделирования в последние десятилетия, как средство для описания сложных социальных систем с различных точек зрения, где результаты подходов дополняют друг друга. В статье представлены предложения по интеграции инструментов технического моделирования в социально-экономические и социотехнические системы для обеспечения детерминированности системы. Результаты данного исследования могут быть использованы при выборе инструмента проектирования и прогнозирования поведения различных социально-экономических и социотехнических систем.

Ключевые слова: социально-экономические системы; моделирование социально-экономических систем; гибридное моделирование; инструменты моделирования; цифровое моделирование; типы гибридации; применение гибридных моделей.

✉ Зубкова Дарья Андреевна
e-mail: daria.zubkova@spbpu.com



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема принятия обоснованных управленческих решений при управлении социотехническими и социально-экономическими системами имеет высокую научную и практическую значимость. Особенность моделирования социально-экономических систем заключается в увеличении сложности и снижении уровня детерминированности в сравнении с моделированием технических систем. Отсутствие адекватных решаемым задачам методов управления социотехническими и социально-экономическими системами приводит к неоптимальности принимаемых управленческих решений, что значительно снижает качество управления и эффективность функционирования системы в целом [1]. Существующие методы, широко используемые при принятии решений в социотехнических и социально-экономических системах, обладают слабой предсказательной силой, ориентированы на краткосрочный период, зачастую основаны на экспертном мнении, и потому неприменимы для поддержки принятия управленческих решений. Обозначенную научную проблему предлагается решать с помощью инструментов цифрового моделирования. Развитие методологической базы и разработка практик цифрового моделирования социотехнических и производственных систем позволит повысить качество принимаемых управленческих решений, а также создаст синергетический эффект применения цифровых моделей в различных отраслях реального сектора экономики.

1. МЕТОДЫ

1.1. Базовые парадигмы моделирования

Имитационное моделирование — важный инструмент в исследовании социально-экономических систем. Оно позволяет имитировать поведение реальной системы, проводить над ней различные эксперименты, прогнозировать дальнейшее развитие событий. Кроме того, сам процесс моделирования позволяет исследователям глубже понять изучаемую систему

и в формализованном виде предоставить результаты исследования другим ученым.

Существует несколько базовых парадигм имитационного моделирования, которые кардинально отличаются друг от друга целями, уровнями детализации и абстракции, подходом к течению времени. Три основные парадигмы — системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование.

Существуют и иные парадигмы моделирования, к примеру динамика систем или игровое моделирование [2], но их применение возможно в слишком узкоспециализированных отраслях для решения конкретных проблем.

Каждый из трех основных подходов (системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование) обладает собственными преимуществами и недостатками, поэтому очень важно в начале построения модели выбрать тот подход, который в наиболее полной мере отвечает целям исследования [3].

Дискретно-событийный подход (DES) представляет моделируемый процесс, динамику изменения системы как последовательность дискретных событий, происходящих с определенными интервалами. Он оперирует такими понятиями как сущности (внешние элементы, поступающие в систему), события (изменение статуса сущностей), ресурсы (объекты, изменяющие статус сущностей в системе) [4]. Визуализация моделей в дискретно-событийном подходе заключается в статично расположенных элементах системы (ресурсах, очередях, логических операторах) и перемещающихся между ними сущностях, находящихся в определенном статусе в любой момент времени. С помощью дискретно-событийного подхода обычно моделируются логистические и производственные системы, системы массового обслуживания [5].

Системная динамика (SD) использует другой подход, основанный на непрерывном изменении некоторых величин во времени. Системная динамика, по аналогии с дискретно-событийным подходом, оперирует тремя объектами: запасами (накапливаемые интегральные величины), потоками (величины,

изменяющие значения запасов), конверторами (вспомогательные величины без определенной динамики) [6]. Визуализация моделей в системной динамике представляет собой статичную комбинацию элементов всех трех видов, соединенных определенным образом. Важной особенностью моделей в системной динамике является возможность качественно спрогнозировать поведение системы без проведения имитационного эксперимента на основе причинно-следственных связей, которые представлены и визуализированы в модели [7]. Системная динамика используется при высокоабстрактном моделировании социотехнических систем.

Агентное моделирование (ABS) представляет моделируемые системы как совокупности автономных элементов (агентов), которые имеют собственные характеристики и модели поведения. В процессе моделирования они взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой, переходя при этом из одного состояния в другое [8]. Из-за сравнительной новизны подхода визуализация моделирования ещё не имеет стандартных решений, поэтому значительно различается от программного средства моделирования. При этом, как правило, инструменты визуализации результатов в таких программных средствах имеют важное значение. Из-за универсальности представления моделируемых систем агентное моделирование применяется для решения самых разнообразных задач различных степеней абстракции и детализации [9].

1.2. Инструменты моделирования

Для социально-экономических систем имитационное моделирование — наиболее адекватный способ изучения систем и процессов в условиях отсутствия полной, точной и достоверной информации о их свойствах. Однако несмотря на акцент на социально-экономических и социотехнических моделях, стоит интегрировать инструменты и подходы, использующиеся для моделирования технических систем. Данный подход обусловлен необходимостью в максимально возможной детерминированности и прозрачности ре-

зультатов. В рамках работы были выделены следующие инструменты моделирования технических систем, которые необходимо интегрировать в модели социально-экономических и социотехнических систем:

- математическое моделирование и динамическое прогнозирование — выполнение серий виртуальных испытаний (имитационных экспериментов);
- интервальный подход — сокращение влияния условий неопределенности в исходных данных для моделирования на итоговый результат; для предоставления возможности формирования семейства прогнозов;
- анализ чувствительности — оценка влияния возможных неточностей в исходных данных на результаты моделирования;
- калибровка — актуализация прогнозов на основе текущих расхождений между прогнозными и фактическими рядами данных;
- верификация — подтверждение соответствия результатов имитационных экспериментов существующим ментальным моделям;
- валидация — подтверждение соответствия результатов имитационных экспериментов реальным данным.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Гибридное моделирование

В последнее десятилетие в исследовании операций получило развитие так называемое гибридное моделирование. Под этим термином понимается сочетание различных парадигм в целях моделирования одной системы.

В статье [10] дается следующее определение: «Гибридным называется такое моделирование, которое сочетает в себе два или более методов моделирования для достижения результатов, получение которых невозможно с применением сочетаемых методов в отдельности».

Следует заметить, что речь в данном случае идет не об использовании различных подходов к моделированию в рамках одной модели или даже в рамках одного программного средства. Гибридное моделирование является исключительно методологическим подходом,

позволяющим изучить один и тот же моделируемый объект с разных сторон или на разных уровнях абстракции [11]. Однако, создание программных средств, предназначенных именно для гибридной симуляции, возможно уже в самом скором будущем.

Хотя сама концепция комбинации различных видов моделирования не отличается особой сложностью и оригинальностью, в последние годы её популярность продолжает расти. Существуют основания полагать, что данный факт связан с необходимостью более полного изучения интересующих систем с использованием отдельных подходов к моделированию.

Популярность гибридного подхода увеличивается также и при моделировании социотехнических систем для оптимизации управления — это подтверждается положительной динамикой количества публикаций в доменах исследования операций, систем управления, промышленного инжиниринга.

Гибридное моделирование является собирательным термином для различных подходов, которые имеют свои особенности применения. Различные классы гибридных моделей решают различные задачи. В настоящей работе рассматривается классификация гибридных моделей по двум признакам: по набору комбинируемых базовых подходов и по типу взаимозависимостей базовых подходов внутри гибридного.

Классификация гибридного моделирования представлена на рис. 1. [10].

Гибридное моделирование подразделяется на четыре вида по набору комбинируемых базовых подходов к моделированию. Наиболее популярным в исследовании операций является сочетание системно-динамического и дискретно-событийного подхода [12] — на его долю приходится практически половина всех случаев применения гибридного моделирования. Примерно в равном соотношении применяются сочетания агентного подхода с дискретно-событийным и с системно-динамическим.

Меньше всего случаев сочетания сразу трех подходов, что может объясняться как сложностью такого моделирования, так и отсутствием действительной необходимости в изучении систем с использованием таких подходов.

Существует ещё один подход к классификации гибридного моделирования. Авторы статьи предлагают разделять случаи применения гибридного моделирования на основе взаимозависимостей базовых подходов внутри гибридного. Так, по данному критерию модели делятся на четыре класса: сопряженные, последовательные, дополненные и интегрированные.

При сопрягающем гибридном моделировании [13] модели разных классов разрабатываются и применяются в отдельности друг от

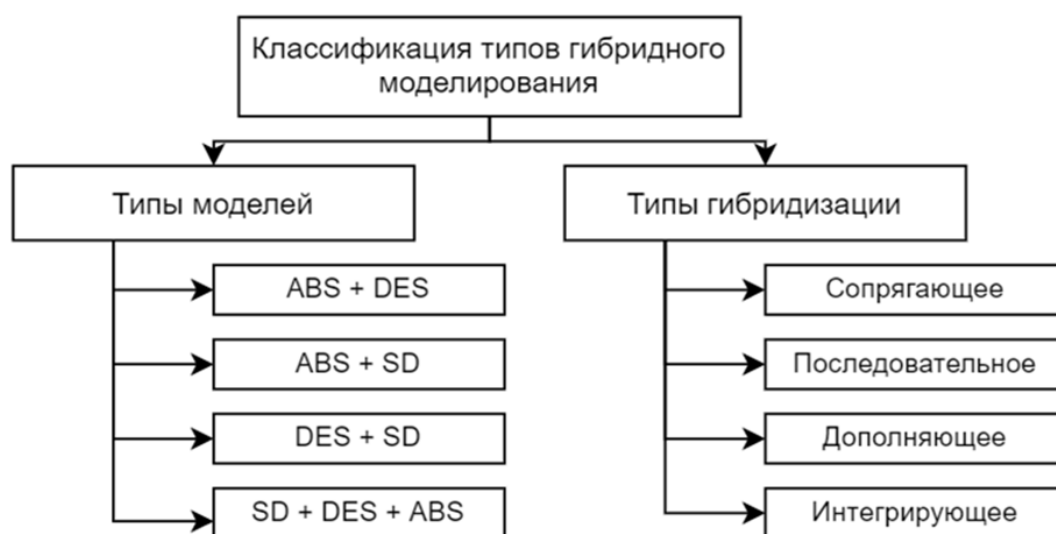


Рис. 1. Классификация методов гибридного моделирования
[Fig. 1. Classification of hybrid modeling methods]

друга (рис. 2). Преимущество данного подхода в том, что на разных этапах разработки и применения моделей (в том числе, и на моменте получения результатов) существует возможность кросс-валидации моделей, сравнения промежуточных или итоговых результатов для выявления возможностей к улучшению или дополнению.

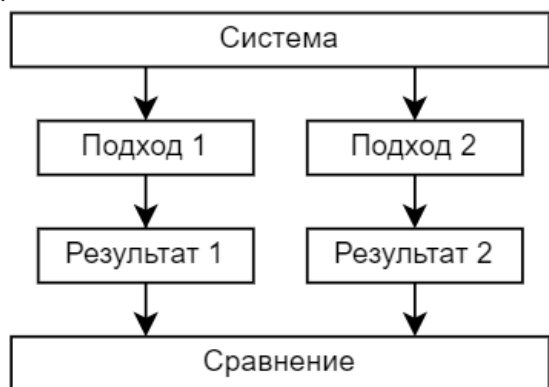


Рис. 2. Блок-схема сопрягающего типа гибридизации
[Fig. 2. Block diagram of the mating type of hybridization]

При последовательном гибридном моделировании [14] базовые подходы применяются один за другим, сами модели не связаны, но результаты предыдущего метода используются в следующем методе (рис. 3).

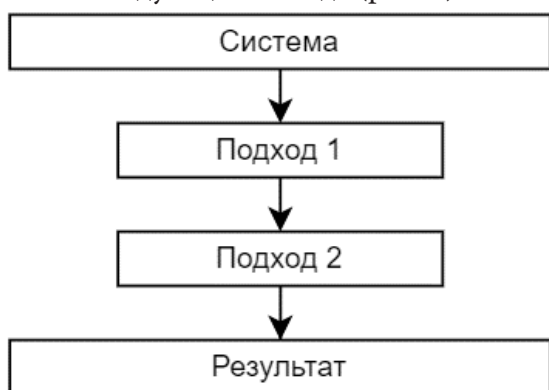


Рис. 3. Блок-схема последовательного типа гибридизации
[Fig. 3. Block diagram of the sequential type of hybridization]

Данный подход гибридного моделирования позволяет моделировать системы со сложным многоуровневым поведением, которое сложно описывается с применением только одного из базовых подходов.

При дополняющем гибридном моделировании [15] один из применяемых базовых подходов является основным, а в процессе его применения используются результаты, полученные в процессе моделирования с использованием других подходов (рис. 4). Данный подход гибридного моделирования применим в том случае, если для достижения основной цели моделирования существует необходимость рассмотрения системы или её отдельных элементов на разных уровнях абстракции и детализации.

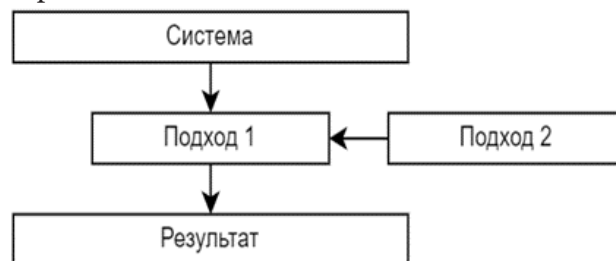


Рис. 4. Блок-схема дополняющего типа гибридизации
[Fig. 4. Block diagram of the complementary type of hybridization]

При интегрирующем гибридном моделировании [16] разные подходы применяются при моделировании разных подсистем, но моделирование не выполняется обособленно, присутствует постоянная взаимосвязь между моделями разных типов (рис. 5).

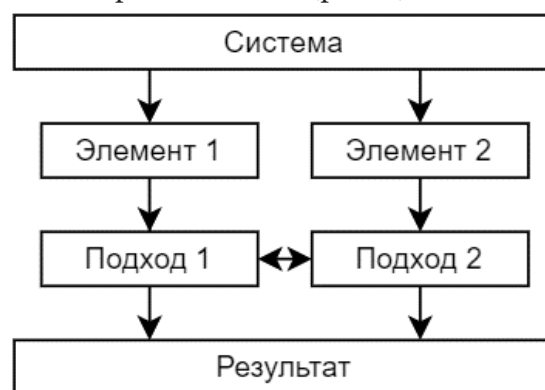


Рис. 5. Блок-схема интегрирующего типа гибридизации
[Fig. 5. Block diagram of the integrating type of hybridization]

Такой подход гибридного моделирования рационально применять при работе со сложными по составу системами, элементы которых отличаются качественной неоднородно-

стью, но при этом в значительной степени являются взаимосвязанными. Именно поэтому такой класс подходов является наиболее часто встречаемым при моделировании socio-технических систем.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Переход к гибриднему моделированию позволяет получить значительно больше информации о системе, рассматривая ее с точки зрения разных элементов, зачастую не пересекающихся в рамках классических подходов имитационного моделирования. Однако, вопрос выбора определенного подхода и типа моделирования вызывает дополнительные сложности за счет избытка возможных вариантов. Анализ опыта применения гибридных моделей в различных отраслях представлен в табл. 1. Ссылаясь на изученные данные, можно отметить применимость различных подходов для решения строго определенных задач.

На основании проанализированных моделей можно сделать вывод о применимости моделей типа SD+DES+ABS в сфере здравоохранения [17] и производственных системах, в зависимости от того, нужно ли основываться на результатах агентов и индивидуальном поведении отдельного объекта.

Модели типа SD+DES чаще всего применяются для моделирования управления производством и операциями [18, 19]. DES имеет ресурсы, которые ограничены, и рассматривает всё с точки зрения отдельного объекта. Однако, DES не учитывает стабильность системы, что очень важно при анализе на агрегированном уровне планирования. В то время, как SD рассматривает систему в более общем смысле и непрерывно. SD имитирует эндогенное поведение в результате петель обратной связи и задержек [20–22].

Модели типа SD+ABS хорошо имитируют взаимодействие населения и инфраструктуру города, когда необходимо учитывать индиви-

Таблица 1. Применение гибридных моделей
[Table 1. Application of hybrid models]

Тип модели	Пример моделирования
SD	1) Схема совместного потока для моделирования рабочей силы и ее коллективной производительности [20]. 2) Завершение производства в производственной модели [21]. 3) Динамика эпидемии в закрытой популяции, например пассажиры в поезде [20]. 4) Моделирование работы резервуаров, труб или большого количества мелких деталей, которые лучше моделировать как количества, а не как отдельные объекты [21].
DES	1) Поток пациентов через амбулаторное отделение в течение суток [20]. 2) Производство продукции: при совершении определенного события (этапа разработки) станок передает деталь дальше / совершает дополнительную обработку детали и т. д. [21].
ABS	1) Модель выбора продукции в продовольственном магазине [21]. 2) Модель поведения человека в эпидемиологической ситуации [21].
SD+DES	1) Модель цепочки поставок и продажи нового продукта на потребительском рынке в условиях нулевой конкуренции. DES используется для моделирования цепочки поставок и SD для моделирования рынка с помощью запасов и диаграммы потока [23, 24]. 2) Модель производства имитируется с помощью SD, а средние значения (поток данных), которые поступают на вход модели SD, моделируются с помощью DES. То есть выход модели DES является входом модели SD [22].

SD+ABS	<p>1) Моделирование взаимодействия населения и инфраструктуры города. Люди — это агенты, которые влияют на другие переменные. А модель SD используется для имитирования цен на жилье, питание и т. д. [23].</p> <p>2) Модель потребительского рынка, в которой потребители моделируются индивидуально как агенты, а динамика принятия потребительских решений моделируется с использованием модели SD. Запасы отражают восприятие продуктов потребителями, индивидуальную осведомленность, знания, опыт и т. д. Общение между потребителями моделируется как дискретные события обмена информацией.</p> <p>3) Взаимодействие организаций (агентов), внутренняя динамика которых моделируется в виде диаграмм запасов и потоков. Компания разрабатывает и продает потребительские товары с достаточно коротким жизненным циклом. После успешного запуска продукта его доход достигает пика, а затем падает [23].</p> <p>4) Усилия правительства по сокращению числа повстанцев в государстве [23].</p>
DES+ABS	<p>1) Взаимодействие системы обслуживания и клиентов: колл-центр, офисы, веб-сервер, магазины или ИТ-инфраструктура. По мере роста клиентской базы увеличивается нагрузка на систему. Система обслуживания имитируется с помощью DES. Где запросы — объекты, операторы, кассиры и т. д. — ресурсы. А пользователи, потребители, клиенты, использующие систему — агенты [23].</p> <p>2) Агенты становятся сущностями для типа модели DES. Например, больные с хроническими заболеваниями поступают в больницу. Больница моделируется по типу DES, а больные ABS. То есть во время лечения пациенты моделируются как субъекты процесса. После выписки из больницы они не исчезают из модели, а продолжают существовать как агенты, и их заболевания продолжают прогрессировать, пока они снова не поступят в больницу. Случай госпитализации и тип необходимого лечения зависят от состояния агента [23].</p>
SD+DES+ABS	<p>1) Модель цепочки поставок, которая поставяет товары на потребительский рынок, рынок может быть описан в терминах SD, розничные торговцы, дистрибьюторы и производители могут быть смоделированы как агенты, а операции внутри этих компонентов цепочки поставок могут быть смоделированы в виде блок-схем процессов DES [23].</p> <p>2) Моделирование контактов между пациентами и медицинскими работниками и вероятность передачи вируса на основе индивидуальных характеристик и принятых мер инфекционного контроля. Модель отделения больницы имитирует параметры отделения, политику инфекционного контроля, поток пациентов через отделение и распределение коек. Системная динамика использовалась для моделирования потока пациентов. Эта модель имитирует переводы пациентов из одной палаты в другую с временным ожиданием. Поведение людей описывается агентной моделью, поступление в больницу и очереди через событийно-дискретное моделирование, а управление потоками заболевших на основе системной динамики [23].</p>

дуальные потребительские решения с учетом политики государственных органов.

Модели типа DES+ABS имитируют бизнес-процессы там, где идет взаимодействие системы обслуживания и клиентов: магазины, колл-центры, клиника.

На следующем этапе необходимо рассмотреть применение разных типов гибридизации в зависимости от целей моделирования. Распределение моделей согласно типам гибридизации представлено в табл. 2.

На основании проанализированного материала можно сделать вывод о том, что интеграционный тип гибридизации чаще всего применяется в сфере здравоохранения, а также в бизнес-процессах, которые являются сложными по составу и взаимодействию системами. Например, для социотехнических систем очень важно взаимодействовать между пациентом и больницей. Поэтому данный тип гибридизации, где различные модели взаимосвязаны, является наиболее перспективным в использовании в сфере здравоохранения, хоть и может использоваться и в экономике, логистике и экологии [20–22].

При моделировании системы обслуживания и бизнес-процессов используется дополняющий тип гибридизации. Модель типа DES будет использоваться как основная, а ABS как дополняющая — для описания поведения агентов, клиентов. Аналогично, продажа

продукта может моделироваться с помощью модели DES, а цепочка поставок данных продуктов в магазин с помощью SD [20].

Последовательный тип подходит для моделирования процесса управления производством, различными операциями и организациями. Часто применим в логистике, экономике. Например, модель производства осуществляется при помощи SD, а поток данных на вход этой модели имитируется при помощи модели DES [21].

Сопрягающий тип гибридизации не используется при моделировании социотехнических систем, поскольку рассматривает модели и их результаты отдельно друг от друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассматриваются подходы к моделированию социально-технических и социально-экономических систем. Рассмотрены основные парадигмы имитационного моделирования: системная динамика, дискретно-событийное и агентное моделирование. На основе этих трех парадигм моделирования представлены концепции различных способов гибридизации этих парадигм: сопряженной, последовательной, дополненной и интегрированной. Каждая из этих концепций имеет свои преимущества, поэтому выбор зависит от характеристик объекта модели-

Таблица 2. Распределение моделей по типам гибридизации
[Table 2. Distribution of models by types of hybridization]

Тип гибридизации	Пример моделирования
Сопрягающий	–
Последовательный	Модель производства имитируется с помощью SD, а средние значения (поток данных), которые поступают на вход модели SD, моделируются с помощью DES. То есть выход модели DES является входом модели SD [22].
Дополняющий	Модель цепочки поставок и продажи нового продукта на потребительском рынке в условиях нулевой конкуренции [23]. Взаимодействие системы обслуживания и клиентов: колл-центр, офисы, веб-сервер, магазины или ИТ-инфраструктура [23].
Интеграционный	Разработка имитационного моделирования инфекционного контроля заболеваемости [23]. Модель цепочки поставок, которая поставляет товары на потребительский рынок [24].

рования. Другая классификация гибридных моделей основана на сочетании различных парадигм. Наиболее популярной комбинацией является системно-динамический подход с дискретно-событийным подходом — около 50 % проанализированных статей. Таким образом, необходимо обеспечить двухэтапный выбор модели: выбор парадигм в зависимости от целей моделирования, выбор метода гибридации в зависимости от характеристик объекта моделирования. В рамках исследования рассмотрен опыт применения разных типов моделей в зависимости от отрасли и задач исследования. Представленное исследование послужит аналитической основой для моделирования социально-технических и социально-экономических систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-03-2022-010 от 14.01.2022).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Итс, А. Е.* Математическая модель для оценки эффективности работы руководителя проекта при реализации инновационной деятельности / А. Е. Итс, С. Г. Редько // *Инновации*. – 2017. – № 11 (229). – С. 77–82.
2. *Jahangirian M. et al.* Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*. – 2010. – 201 (1). – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.06.004
3. *Maidstone R.* Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison. *Researcher Gate*. – 2012. – P. 1–6.
4. *Castanon Guimaraes A. M., Leal J. E., Mendes P.* Discrete-event simulation software selection for manufacturing based on the maturity

model. *Computers in Industry*. 2018. – 103. – P. 14–27. DOI: 10.1016/j.compind.2018.09.005

5. *Coelho, P. et al.* Operational improvement of an industrial equipment rental system using discrete event simulation. *IFA. PapersOnLine*. – 2018. – 51 (11). – P. 478–483. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.364

6. *Rebs T., Brandenburg M., Seuring S.* System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – 208. – P. 1265–1280. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.100

7. *Tsvetkova N. A.* Simulation modeling the spread of innovations Saint Petersburg, Russia. In: N. A. Tsvetkova, I. L. Tukkel, V. I. Ablyazov. *International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. IEEE. – 2017. – P. 675–677.

8. *Hansen P., Liu X., Morrison G. M.* Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review. *Energy Research & Social Science*. 2019. – 49. – P. 41–52. DOI: 10.1016/j.erss.2018.10.021

9. *Utomo D. S., Onggo B. S., Eldridge S.* Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains. *European Journal of Operational Research*. – 2018. – 269 (3). – P. 794–805. DOI: 10.1016 / j . e j o r . 2 0 1 7 . 1 0 . 0 4 1

10. *Brailsford C. et al.* Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*. – 2018.

11. *Burger K., White L., Yearworth M.* Developing a smart operational research with hybrid practice theories. *European Journal of Operational Research*. – 2019. – 277 (3). – P. 1137–1150. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.03.027

12. *Jamalnia A., Feili A.* A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. *Production Planning and Control*. – 2013. – 24 (6). – P. 423–448. DOI: 10.1080/09537287.2011.631595

13. *Barbosa C., Azevedo A.* Hybrid simulation for complex manufacturing value-chain environments. *Procedia Manufacturing*. 2017. – 11. – P. 1404–1412. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.270

14. *Scholl H. J.* Using integrated top-down and bottom-up dynamic modeling for triangulation and interdisciplinary theory integration.

М. В. Болсуновская, А. М. Гинцяк, Ж. В. Бурлуцкая, А. А. Петряева,
Д. А. Зубкова, М. Б. Успенский, И. А. Селедцова

- In: Scholl, H. J., Phelan, H. J. XXII International Conference of the System Dynamics Society. Oxford, England. – 2004.
15. Jain S *et al.* A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in supply chains. *International Journal of Production Economics*. – 2013. – 146 (2). – P. 411–422. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.03.015
16. Pawlewski P. DES/ABS approach to simulate warehouse operations. *Communications in Computer and Information Science*. – 2015. – 524. – P. 115–125. DOI: 10.1007/978-3-319-19033-4_10
17. Abdelghany M. Individual versus integrated simulation techniques in healthcare applications. In: Abdelghany M., Eltawil A. B. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Selangor, IEEE. – 2014. – P. 1214–1218. DOI: 10.1109/IEEM.2014.7058831
18. Tako A. A. Comparing model development in discrete event simulation and system dynamics. In: Tako A. A., Robinson S. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE. – 2009. – P. 979–991. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429423
19. Borshchev A. *et al.* Multi-method modelling: AnyLogic. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*. – 2014. – 9781118349021. – P. 248–279. DOI: 10.1002/9781118762745.ch12
20. Brailsford S. C. *et al.* Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*. – 2018. – 278 (№ 3). – P. 721–737.
21. Barbosa C., Azevedo A. Hybrid simulation for complex manufacturing value-chain environments. *Procedia Manufacturing*. – 2017. – 11. – P. 1404–1412. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.270
22. Jamalnia A., Feili A. A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. *Production Planning & Control*. – 2013. – 6. P. 423–448. DOI: 10.1080/09537287.2011.631595
23. Brailsford S., Churilov L., Dangerfield B. (ed.). *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*. Chichester, John Wiley & Sons. – 2014. – DOI: 10.1002/9781118762745.ch03
24. Dangerfield B. *Systems thinking and system dynamics: A primer*. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*. – 2014. – 9781118349021. – P. 26–51.
25. dos Santos V. H. A review of hybrid simulation in healthcare. In: dos Santos V. H., Kotiadis K., Scaparra, M. P. *2020 Winter Simulation Conference (WSC)*. Orlando, IEEE. – 2020. – P. 1004–1015. DOI: 10.1109/WSC48552.2020.9383913

Болсуновская Марина Владимировна — канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Промышленные системы потоковой обработки данных» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: marina.bolsunovskaia@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6650-6491>

Гинцяк Алексей Михайлович — заведующий лабораторией «Цифровое моделирование промышленных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: aleksei.gintciak@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>

Бурлуцкая Жанна Владиславовна — мл. науч. сотр. лаборатории «Цифровое моделирование промышленных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>

Петряева Александра Андреевна — мл. науч. сотр. лаборатории «Цифровое моделирование индустриальных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: alexandra.petryaeva@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6650-6491>

Зубкова Дарья Андреевна — мл. науч. сотр. лаборатории «Цифровое моделирование индустриальных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: daria.zubkova@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1106-5080>

Успенский Михаил Борисович — ведущ. науч. сотр. лаборатории «Цифровое моделирование индустриальных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: mikhail.uspenskiy@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3417-7376>

Селедцова Инна Алексеевна — старший преподаватель Высшей школы киберфизических систем и управления ИКНТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: seledtsova_ia@spbstu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4423-4162>

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>

ISSN 1995-5499

Received 06.05.2022

Accepted 30.09.2022

THE OPPORTUNITIES OF USING A HYBRID APPROACH FOR MODELING SOCIO-ECONOMIC AND SOCIOTECHNICAL SYSTEMS

© 2022 M. V. Bolsunovskaya, A. M. Gintciak, Z. V. Burlutskaya, A. A. Petryeva, D. A. Zubkova✉, M. B. Uspenskiy, I. A. Seledtsova

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, building 11, Politechnicheskaya Street, 195251 St. Petersburg, Russian Federation*

Annotation. This work is aimed at preparing a methodological basis for modeling socio-economic and sociotechnical systems. The types of simulation modeling are considered from the point of view of selecting the optimal solution depending on the characteristics of the object of research and the purpose of modeling. Among the considered models, as a tool for modeling socio-economic and sociotechnical systems, the greatest attention is paid to hybrid models that allow studying the analyzed object from different sides and at different levels of abstraction, combining well-known simulation approaches. In addition, hybrid models are used in many areas, such as healthcare, economics, ecology, marketing, industrial enterprises and production systems, which ensures their versatility, relevance and effectiveness of this approach. Within the framework of the study, the articles of the Scopus database of scientific publications devoted to the modeling of socio-economic and sociotechnical systems, simulation modeling and hybrid models were analyzed. This article discusses the basic paradigms of simulation modeling and the methods used to model socio-economic and sociotechnical systems, classifies by model type and

✉ Zubkova Daria A.
e-mail: daria.zubkova@spbpu.com

М. В. Болсуновская, А. М. Гиньяк, Ж. В. Бурлуцкая, А. А. Петряева,
Д. А. Зубкова, М. Б. Успенский, И. А. Селедцова

hybridization, highlights possible combinations of types of hybridization and the applicability of the types considered, reveals the trend towards using hybrid modeling in recent decades as a means to describe complex social systems from different points of view, where the results of campaigns complement each other, also, proposals are presented on the integration of technical modeling tools into socio-economic and sociotechnical systems to ensure the determinacy of the system. The results of this study can be used when choosing a tool for designing and predicting the behavior of various socio-economic and sociotechnical systems.

Keywords: socio-economic systems; modeling of socio-economic systems; hybrid modeling; modeling tools; digital modeling; types of hybridization; application of hybrid models.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. *Its A. E. and Redko S. G.* (2017) *Matematicheskaja model' dlja ocenki jeffektivnosti raboty rukovoditelja proekta pri realizacii innovacionnoj dejatel'nosti* [Mathematical model for evaluating the effectiveness of the project manager in the implementation of innovative activities]. *Innovacii*. 11(229). P. 77–82 (In Russian).
2. *Jahangirian M. et al.* (2010) Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*. 201 (1). P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.06.004
3. *Maidstone R.* (2012) Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison. *Researcher Gate*. P. 1-6.
4. *Castanon Guimaraes A. M., Leal J. E. and Mendes P.* (2018) Discrete-event simulation software selection for manufacturing based on the maturity model. *Computers in Industry*. 103. P. 14–27. DOI: 10.1016/j.compind.2018.09.005
5. *Coelho P. et al.* (2018) Operational improvement of an industrial equipment rental system using discrete event simulation. *IFAC PapersOnLine*. 51 (11). P. 478–483. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.364
6. *Rebs T., Brandenburg M. and Seuring S.* (2019) System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*. 208. P. 1265–1280. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.100
7. *Tsvetkova N. A.* (2017) Simulation modeling the spread of innovations Saint Petersburg, Russia. In: N. A. Tsvetkova, I. L. Tукkel, V. I. Ablyazov. *International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. IEEE. P. 675–677.
8. *Hansen P., Liu X. and Morrison G. M.* (2019) Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review. *Energy Research & Social Science*. 49. P. 41–52. DOI: 10.1016/j.erss.2018.10.021
9. *Utomo D. S., Onggo B. S. and Eldridge S.* (2018) Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains. *European Journal of Operational Research*. 269 (3). P. 794–805. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.10.041
10. *Brailsford C. et al.* (2018) Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*.
11. *Burger K., White L. and Yearworth M.* (2019) Developing a smart operational research with hybrid practice theories. *European Journal of Operational Research*. 277 (3). P. 1137–1150. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.03.027
12. *Jamalnia A. and Feili A.* (2013) A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. *Production Planning and Control*. 24 (6). P. 423–448. DOI: 10.1080/09537287.2011.631595
13. *Barbosa C. and Azevedo A.* (2017) Hybrid simulation for complex manufacturing value-chain environments. *Procedia Manufacturing*. 11. P. 1404–1412. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.270
14. *Scholl H. J.* (2004) Using integrated top-down and bottom-up dynamic modeling for triangulation and interdisciplinary theory integration. In: *Scholl H. J., Phelan H. J.* XXII International Conference of the System Dynamics Society. Oxford, England.
15. *Jain S. et al.* (2013) A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in sup-

ply chains. *International Journal of Production Economics*. 146 (2). P. 411–422. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.03.015

16. Pawlewski P. (2015) DES/ABS approach to simulate warehouse operations. *Communications in Computer and Information Science*. 524. P. 115–125. DOI: 10.1007/978-3-319-19033-4_10

17. Abdelghany M. (2014) Individual versus integrated simulation techniques in healthcare applications. In: Abdelghany M., Eltawil A. B. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Selangor, IEEE*. P. 1214–1218. DOI: 10.1109/IEEM.2014.7058831

18. Tako A. A. (2009) Comparing model development in discrete event simulation and system dynamics. In: Tako, A. A., Robinson, S. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE*. P. 979–991. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429423

19. Borshchev A. et al. (2014) Multi-method modelling: AnyLogic. Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making. 9781118349021. P. 248–279. DOI: 10.1002/9781118762745.ch12

20. Brailsford S. C. et al. (2018) Hybrid simulation modelling in operational research: A state-

of-the-art review. *European Journal of Operational Research*. 278 (No 3). P. 721–737.

21. Barbosa C. and Azevedo A. (2017) Hybrid simulation for complex manufacturing value-chain environments. *Procedia Manufacturing*. 11. P. 1404–1412. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.270

22. Jamalnia A. and Feili A. (2013) A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. *Production Planning & Control*. 6. P. 423–448. DOI: 10.1080/09537287.2011.631595

23. Brailsford S., Churilov L. and Dangerfield B. (ed.). (2014) Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making. Chichester, John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781118762745.ch03

24. Dangerfield B. (2014) Systems thinking and system dynamics: A primer. Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making. 9781118349021, 26–51.

25. dos Santos V. H. (2020) A review of hybrid simulation in healthcare. In: dos Santos V. H., Kotiadis K., Scaparra M. P. 2020 Winter Simulation Conference (WSC). Orlando, IEEE. P. 1004–1015. DOI: 10.1109/WSC48552.2020.9383913

Bolsunovskaya Marina V. — Ph.D. in Technology, Head of Laboratory of Industrial Systems for Streaming Data Processing, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation. E-mail: marina.bolsunovskaia@spbpu.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6650-6491>

Gintciak Aleksei M. — Head of Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation. E-mail: aleksei.gintciak@spbpu.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>

Burlutskaya Zhanna V. — Junior researcher of Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation. E-mail: zhanna.burlutskaya@spbpu.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>

Petryaeva Alexandra A. — Junior researcher of Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation. E-mail: alexandra.petryaeva@spbpu.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6650-6491>

*М. В. Болсуновская, А. М. Гинцяк, Ж. В. Бурлуцкая, А. А. Петряева,
Д. А. Зубкова, М. Б. Успенский, И. А. Селедцова*

Zubkova Daria A. — Junior researcher of Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation.

Email: daria.zubkova@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1106-5080>

Uspenskiy Mikhail B. — Leading researcher of Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation.

Email: mikhail.uspenskiy@spbpu.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3417-7376>

Seledtsova Inna A. — Senior Lecturer at School of Cyberphysical Systems and Control, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation.

Email: seledtsova_ia@spbstu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4423-4162>