

УДК 004.94

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЫТА РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ САПР РЛС ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕХНИЧЕСКИХ, ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ КАК ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОАГЕНТНОГО ТИПА

Щирый А.О. (Москва)

### Введение

Концепция Индустрия 4.0. (т.н. Четвертой промышленной революции) ввела в научный оборот понятие «цифровой двойник» (ЦД) как один из элементов перехода к новому технологическому укладу [1-5]. Более того, в Российской Федерации разработан и принят ГОСТ по цифровым двойникам – ГОСТ Р 57700.37-2021 [6], дополнивший семейство ГОСТов по компьютерным моделям [7, 8].

Индустрия 4.0. ставит планы развития технологий «умных заводов», где виртуальные и физические системы производства гибко взаимодействуют между собой. ЦД здесь поможет виртуально взаимодействовать с другими участниками процесса, получать информацию с датчиков, быстро моделировать условия, понимать последствия сценариев, прогнозировать результаты и давать команды к исполнению в реальном физическом мире. ЦД на производстве помогают решать задачи планирования, моделирования и оптимизации производственного процесса. Они представляют собой виртуальные модели производственных объектов, используемые для прогнозирования поведения и оптимизации работы систем. С их помощью можно прогнозировать эффективность производственных единиц, устранять ограничивающие факторы и гарантировать, что продукция выпускается в соответствии с ожиданиями. ЦД имеет множество применений на протяжении жизненного цикла производимого продукта и помогает получить ответы на вопросы, на которые раньше нельзя было ответить, в т.ч. в режиме реального времени. ЦД позволяет получить полный «цифровой след» продуктов – от проектирования и разработки до конца жизненного цикла продукта. Это, в свою очередь, позволит понять не только продукт сам по себе, но и систему, в которой был создан продукт, а также то, как продукт используется в «полевых» условиях.

Однако принятие ГОСТов не устранило терминологическую путаницу, когда под цифровым двойником могут пониматься разные по сути модели – от имитационной модели, работающей в своем модельном времени, не имея непосредственной связи с реальным физическим объектом, до «цифровой копии» физического объекта в реальном времени, получающей данные с объекта от многочисленных датчиков (в последнем случае тоже есть аналогии с имитационными моделями, но особого вида – полунатурными стендами). Однако очевидно, что с точки зрения компьютерной реализации ЦД представляет собой имитационную модель того или иного типа (хотя и в определениях и классификациях имитационных моделей тоже нет единого подхода, о чем будет подробнее сказано ниже).

Неразбериха в понятиях ЦД вызвана отчасти их эволюцией, а также тем, что одни и те же идеи возникают одновременно у разных специалистов, причем понятие ЦД как виртуальной копии реального объекта получило особую актуальность после расцвета технологии «интернета вещей» (internet of things, IoT).

Перспективы применения ЦД не ограничиваются только техническими системами: так в распоряжении правительства РФ [9] говорится: «Технология цифрового двойника будет использоваться в рамках развития отрасли экологии и

природопользования для обновления и создания базы данных нового поколения природных объектов (экосистем), включая недра, водные объекты, леса, среду обитания объектов животного мира».

Примерами ЦД для социальных систем могут быть [10, 11].

### **Основные принципы и понятия имитационного моделирования сложных систем**

Вообще, когда мы имеем дело с некоторой сложной системой, процесс функционирования которой представляет собой совокупность взаимовлияющих процессов, «отягощенную» стохастическими неопределенностями различных параметров, как внутренних, так и внешних (входных), и нас интересует какой-нибудь обобщенный показатель функционирования этой системы и мы хотим его максимизировать, то можно попытаться поставить, например, общую задачу линейного программирования. Для этого нужно знать линейную зависимость обобщенного показателя от управляемых переменных (целевую функцию), а также уметь выразить все взаимосвязи между переменными в форме линейных ограничений. Очевидно, что зачастую не удастся обосновать не только линейный характер зависимости, но и вообще неясно, как влияет тот или иной входной параметр на обобщенный показатель и влияет ли вообще. Действительно, влияние данного параметра (входного воздействия) на исследуемый показатель может «передаваться» через цепь случайных событий, причем результат может качественно меняться в зависимости от того, какая конкретная цепочка событий реализуется в данном наблюдении. Если же законы распределения указанных случайных событий сложны, а сами события нельзя считать независимыми, то попытки «свернуть» эти законы и получить обычную математическую модель становятся чисто умозрительными. В таких условиях достаточно естественным первым шагом исследования является построение математической и/или алгоритмической модели, которая «буквально» воспроизводит случайную последовательность событий, реализующуюся в моделируемой системе. На каждом шаге одного такого воспроизведения (к данному моменту времени имитационного эксперимента) должна учитываться уже полученная часть цепочки событий и законы, по которым может реализоваться очередное событие.

Таким образом, наиболее приспособленными для моделирования сложных систем являются модели имитационного типа. Имитационное моделирование используется как универсальный метод для обоснования решений в условиях неопределенности и для учета трудно формализуемых факторов.

В результате протекания процессов происходят события, переводящие систему из одного состояния в другое в определенные моменты времени. Учет категории времени позволяет рассматривать поведение или динамику системы в рамках некоторого интервала времени. Для полного описания процесса функционирования имитационной модели необходимо иметь средство, позволяющее строго регламентировать моменты времени выполнения оператора перевода состояний модели. С этой целью оператор представляется в виде некоторой структуры данных, называемой заявкой. Эта заявка вносится в список, называемый календарным планом или календарем процессов.

Еще раз остановимся на вопросе терминологии, на этот раз по самим имитационным моделям. В литературе по имитационному моделированию (см., например, [12-15]) нет единой классификации методов и подходов имитационного моделирования, наблюдается несогласованность в терминологии, и вообще говоря, под имитационным моделированием в разных работах могут пониматься совершенно разные подходы. Например, мультиагентный подход зачастую рассматривается в

рамках концепции агентно-ориентированного программирования, вообще без упоминания имитационного моделирования. В других классификациях мультиагентная и дискретно-событийная схемы входят в качестве разных классов. Особняком могут стоять проблемы распределенных моделирующих систем. При том что мультиагентные системы (определяемые общо – как системы автономных интеллектуальных сущностей) зачастую реализуются на основе дискретно-событийной схемы (хотя это зависит от степени автономности агентов) и являются распределенными. В некоторых классификациях, противопоставляющих мультиагентную и дискретно-событийные схемы, дается критерий такого противопоставления: мультиагентной называется система, не имеющая механизма синхронизации модельного времени. Такие классификации не содержат указанного выше внутреннего противоречия, однако сразу возникает вопрос о целесообразности реализации мультиагентной системы, не гарантирующей своевременную доставку агентам данных о состоянии других агентов (любая попытка реализации гарантированной доставки приведет, пусть в неявном виде, к реализации дискретно-событийной схемы).

### **Общая концепция и архитектура моделирующей компьютерной системы**

Имеющийся у автора опыт участия (2016-2021 гг.) в разработке отечественной системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС) [16-19] в части архитектуры моделирующей системы, общих концепций и подходов организации имитационного моделирования (мультиагентного типа, по дискретно-событийной схеме, совместное использование событийной и пошаговой дискретных схем) может быть непосредственно применен для создания сложных компьютерных имитационных моделей других технических систем, а также систем нетехнической природы.

С алгоритмической и программно-архитектурной точки зрения потребная система имитационного моделирования состоит из диспетчера моделирования (ДИМ), других «системных» частей, таких как визуализатор и редактор сценариев, и собственно имитационных моделей агентного типа, представляющих сущности моделируемой области (среди которых для систем многих классов особое место занимает имитатор окружающей среды). Функции ДИМ: чтение сценария, созданного пользователем и содержащего исследуемую конфигурацию «сил и средств»; загрузка и инициализация имитационных моделей; запуск сценария, управление имитационными моделями в процессе моделирования и мониторинг хода его исполнения. Описанная мультиагентная система работает по дискретно-событийной схеме, для реализации которой программно ведется динамическая очередь задач, управляемая диспетчером имитационного моделирования, который определяет порядок передачи управления между вычислительными блоками (агентами, частными моделями). Это делается для синхронизации «модельного времени», причем в условиях, когда модельные агенты «шагают» по времени исходя из своей внутренней логики, временными интервалами произвольного размера. Каждое событие, помещаемое в очередь задач, регистрируется на определенное модельное время. Общей проблематике построения систем имитационного моделирования и, в частности, синхронизации модельного времени (т.н. консервативный и оптимистический подходы) посвящены работы [20, 21], здесь же используется подход, называемый в данных работах консервативным.

Работа с очередью задач в общем виде выглядит так:

- каждый раз из очереди событий выбирается событие с наименьшим модельным временем, это модельное время присваивается счётчику текущего модельного времени;
- выбранное из очереди событие передаётся в обработчик, специфичный для данного типа событий;

- обработчик может как вызывать математические расчёты, так и запланировать в очереди задач новые события, при этом модельное время этих событий должно быть не меньше, чем у текущего события;

- после обработки текущее событие удаляется из очереди.

ДИМ предназначен для осуществления и мониторинга процесса имитационного эксперимента на основе заданного сценария. ДИМ реализует дискретно-событийный вид имитационного моделирования. В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется в виде хронологической последовательности событий. Событие происходит в определённый момент модельного времени и знаменует изменения состояния системы. Входными данными для ДИМ является сценарий имитационного эксперимента. В сценарии содержится информация о моделируемых объектах, среде, в которой они расположены, и параметры процесса проведения имитационного моделирования.

События протоколирования генерируются в ДИМ всегда, протокольную информацию в ДИМ также необходимо записывать в файл. Данная информация является хронологической записью процесса проведения эксперимента и может быть использована, вместе со сценарием, для повторного «проигрывания» эксперимента. В процессе моделирования происходит логирование (сохранение в файлы) состояний системы в целом и атрибутов отдельных агентов. Полученные лог-файлы (протоколы) являются предметом дальнейшего рассмотрения и анализа. Визуализация модельного эксперимента возможна как в реальном времени (этот вариант накладывает некоторые ограничения на моделируемую систему, но позволяет оперативно вмешиваться в процесс моделирования), так и после завершения симуляции. По результатам моделирования оцениваются возможности и эффективность системы, делается вывод о достигнутых характеристиках, если это синтезируемая техническая система. В случае биологических или социальных систем проводится анализ динамики («поведения»).

Очень полезным и интересным решением может быть совмещение двух схем дискретного имитационного моделирования: событийной и пошаговой [18]. Пошаговая схема обладает такими преимуществами, как простота и наглядность реализации процесса моделирования, в ней удобно моделировать алгоритмы обработки данных и составные части устройств и/или систем. Однако в пошаговой схеме невозможны корректное моделирование параллельных процессов, а также взаимодействия автономных асинхронных процессов. Указанных ограничений лишена дискретно-событийная схема, однако, ввиду неопределенности порядка взаимодействия асинхронных агентов, общая схема имитационной модели не обладает такой наглядностью как в случае пошаговой схемы (особенно в случае имитационных моделей, состоящих из большого числа взаимодействующих частей). Для совмещения преимуществ обеих схем предлагается их совместное использование: фрагменты системы, не требующие асинхронности, описываются в пошаговой схеме, а все прочие – в событийной. Поэтому реализуются два планировщика: «высокоуровневый» дискретно-событийный диспетчер и «низкоуровневый» пошаговый. Дискретно-событийный диспетчер взаимодействует с пошаговым планировщиком каждый раз, когда рассчитывает очередной событийный блок.

Для моделей полунатурного типа, когда имеется связь с реальными физическими объектами по получаемым данным и/или часть физических объектов непосредственно участвует в имитации, имитационная моделирующая система может строиться на тех же принципах, с учетом ряда особенностей: модельное время (прежде всего, скорость протекания и масштаб) здесь будет совпадать с реальным временем физического мира, генераторами программных событий также могут выступать события из реального мира.

### Реализация в САПР РЛС

Упомянутая САПР РЛС [16-19] является примером системы, реализующей совмещение двух указанных схем имитационного моделирования: на системном и структурном уровнях проектирования РЛС модели описываются по дискретно-событийной схеме, а на логическом уровне – по схеме пошаговой [18].

Рассмотрим подробнее общую концепцию САПР РЛС и то, как там реализованы показанные выше принципы организации имитационного моделирования.

В САПР РЛС заложена концепция многоуровневого ведения проектирования РЛС, для чего выделены следующие уровни проектирования.

1. Системный уровень: размещение на картах местности РЛС, компонентов радиолокационных комплексов, целей, а также маршрутов их движения, источников помех с заданием типов. Компоненты выбираются из существующих библиотек готовых изделий, образцов (шаблонов), а также из компонентов, создаваемых на следующих (нижних) уровнях проектирования. Данный уровень позволяет оценить эффективность работы группировки РЛС с учетом местности и внешних воздействий в условиях применения конкретных средств воздушно-космического нападения и воздушно-космической обороны.

2. Структурный уровень: создание (сборка) структуры РЛС из готовых модулей (антенно-фидерные устройства, приемники, передатчики и их составные части) – моделей либо реально существующих образцов, либо разработанных на нижних уровнях САПР. На этом уровне проводится исследование возможности создания и оценка показателей эффективности работы отдельных РЛС в целом; обоснование состава отдельных РЛС. Варианты РЛС, собранные на этом уровне, являются неделимыми элементами для системного уровня.

3. Функциональный (логический) уровень: варьирование алгоритмов цифровой обработки информации с целью обеспечения оптимального их сочетания по выбранным критериям эффективности. На этом уровне производится выбор и обоснование оптимальных алгоритмов управления РЛС, типов и параметров используемых сигналов; также на этом уровне оцениваются показатели эффективности работы отдельных РЛС, когда моделируется работа РЛС с точки зрения создания и обработки сигналов и радиолокационной информации.

Отметим, что уровни проектирования следует отличать от этапов проектирования [17], хотя для каждого из этапов можно выделить один или несколько уровней наиболее актуальных на этапе. С точки зрения стадий проектирования, имитационное моделирование выделено в отдельный этап, необходимый для верификации и уточнения параметров проектируемых РЛС, облик которых определен в общем виде на этапах предварительной оценки параметров и инженерного анализа [17].

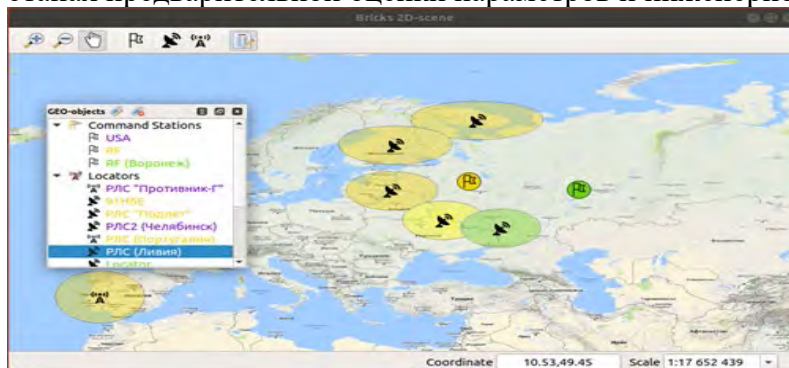


Рис. 1. Редактор радиосцены (системный уровень)

В САПР РЛС пользователь моделирует работу РЛС в условиях воздушного налёта с привязкой к конкретной местности (т.е. в окружении, максимально приближенном к реальному). Результаты моделирования визуализируются в динамике, также при моделировании рассчитывается набор показателей качества работы РЛС. Пользователь может моделировать как одну РЛС, так и группировку, состоящую из одно- или разнотипных РЛС, объединенных в иерархию вместе с командными пунктами. Также пользователь может редактировать имеющиеся модели РЛС или создать собственную модель. Таким образом, функционал системного уровня состоит в основном из двух частей: редактора радиосцены (рис. 1) и функционала для создания сценариев имитационного моделирования боевых действий, с возможностью создания моделей обороняющейся и нападающей боевых группировок. Функционал имитационного моделирования проникает на все три уровня (системный, структурный, функционально-логический).

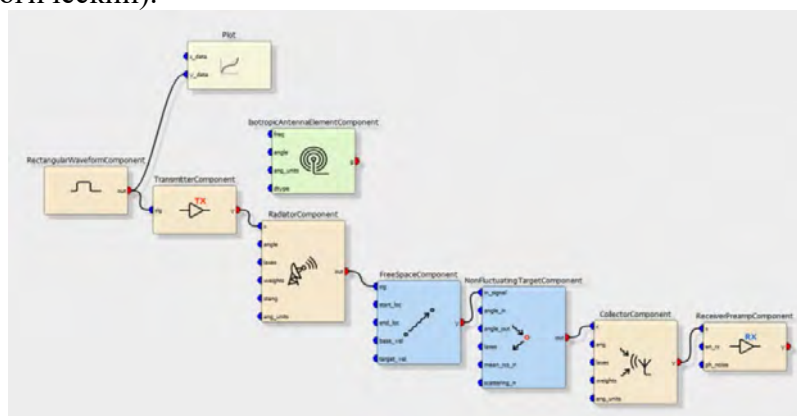


Рис. 2. Редактор графа потоков данных (структурный уровень)

Системный и структурный уровни различаются по следующим аспектам реализуемого в САПР РЛС процесса моделирования.

Системный уровень предназначен для анализа результатов моделирования и ориентирован на оптимизацию размещения РЛС, объединение их в комплексы и системы с разветвлённой иерархией командных пунктов, отработку различных вариантов воздушного нападения, построение траекторий и оснащения объектов на радиосцене. На системном уровне задаются координаты стояния, тип РЛС (роль в группе), количество и координаты антенн, их тип, а также система управления из связанных командных пунктов и средств объединения РЛС в комплексы и системы. Решаются задачи анализа эффективности объединения РЛС в комплексы и системы, эффективности взаимодействия внутри группы, настройки расположения РЛС и траекторий объектов наблюдения, и пр.

Структурный уровень проектирования – это набор программных средств моделирования и анализа результатов моделирования, ориентированный на оптимизацию параметров приёмных и передающих трактов РЛС, модулей управления антеннами и антенными решетками, других конструктивных элементов РЛС. Предполагается, что облик оптимизируемой РЛС и требования к её техническим параметрам определены на системном уровне, а структурный используется для поиска наилучших технических решений для достижения указанных требований. Решаются задачи анализа эффективности работы конкретных технических элементов приёмных и передающих трактов, использования антенн с заданной геометрией и системой управления и пр. В САПР создана база готовых элементов приёмных и передающих трактов РЛС, антенн и пр. Это позволяет проводить сравнение компоновок РЛС на базе готовых модулей, производство которых освоено, а также исследовать вопросы

необходимости разработки новых образцов указанной техники. На структурном уровне РЛС представлена набором компонентов – программных модулей и связей между ними. Модель РЛС на структурном уровне, выполненную в виде графа потоков данных, можно отображать, создавать и оперативно корректировать визуальными средствами редактора (рис. 2). Настройки режимов работы такой модели возможны путём задания фактических параметров работы её элементов, а также путём глубокой переконфигурации в редакторе. Структурные модели РЛС могут использоваться для решения задач системного уровня без ограничений. На обоих уровнях моделирования расчёт работы РЛС происходит одинаково, только на системном уровне внутренняя структура станции скрыта от пользователя. Блоки структурного уровня позволяют «опуститься» (посредством двойного клика) на более низкий уровень проектирования – функционально логический, с переходом к графу потоков данных и передачи управления. Подчеркнем, что граф функционально-логического уровня определяет и потоки данных, и потоки передачи управления, в то время как граф структурного уровня только потоки данных, так как последовательность передачи управления здесь не определена по причине асинхронности («внутреннего интеллекта») модельных блоков. Напомним, что важнейшее отличие моделирования на функциональном уровне от моделирования на структурном и системном уровнях заключается в том, что имитационное моделирование на нем реализовано по пошаговой схеме, а на 1 и 2 уровнях – по дискретно-событийной схеме.

### **Заключение**

Итак, в работе показана возможность применения опыта и наработок, полученных в ходе создания отечественной САПР РЛС, к задачам разработки ЦД. Показано что ЦД имеют прямые аналоги в моделях имитационного типа, при этом имеется ввиду весь спектр разновидностей моделей – от имитационных моделей, работающих в собственном модельном времени, не имея непосредственной связи с реальным физическим объектом, до «цифровых копий» физического объекта в реальном времени, получающих данные с объекта от различных датчиков.

### **Литература**

1. **Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С.** Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 2(92). – С. 42-48.
2. **Дозорцев В.М.** Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее? // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 7. – С. 3-14.
3. **Дозорцев В.М.** Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 3-11.
4. **Дозорцев В.М.** Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 2. Ключевые технологии цифровых двойников. Типы моделирования физического объекта // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 11. – С. 3-10.
5. **Дозорцев В.М.** Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 3. Прикладные платформы,

практические примеры, прогнозы развития, вызовы // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 5-14.

6. ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

7. ГОСТ Р 57700.22-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация».

8. ГОСТ Р 57412 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

9. Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2021 г. № 3496-р Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования.

10. **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С.** Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // Программная инженерия. – 2019. – Т.10. № 4. – С.167-177.

11. **Белотелов Н.В., Логинов Ф.В.** Агентная модель межкультурных взаимодействий: возникновение культурных неопределенностей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14, № 5. – С. 1143–1162.

12. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука: Пер. с англ. / Под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

13. Имитационное моделирование: учебное пособие / сост. Д.В. Арясова, М.А. Аханова, С.В. Овчинникова. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – 186 с.

14. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П.А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И.Н. – Тверь, 2013. – 528 с.

15. **Бродский Ю.И.** Распределенное имитационное моделирование сложных систем. – М.: Вычислительный центр им. А.А. Дороницына РАН, 2010. – 156 с.

16. **Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О.** Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2018. – № 21. – С.290-293.

17. **Арутюнян А.А., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О.** Уровни и этапы проектирования и исследования перспективных радиолокационных станций в отечественной специализированной САПР // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. ISSN 1684-1719. – 2022. – № 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>

18. **Щирый А.О.** Совмещение событийной и пошаговой схем дискретного имитационного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 12. – С. 338-342.

19. **Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О.** Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2019. – Т.11, № 1. – С. 4-11.

20. **David R. Jefferson, Peter D. Barnes Jr.** Virtual time III: Unification of conservative and optimistic synchronization in parallel discrete event simulation // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. – Pp.786-797.

21. **Richard M. Fujimoto, Rajive L. Bagrodia, Randal E. Bryant, K. Mani Chandy, David R. Jefferson, Jayadev Misra, David M. Nicol, Brian W. Unger.** Parallel discrete event simulation: The making of a field // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. – Pp.262-291.