

УДК 004.7

К АНАЛИЗУ ПАРАДИГМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.И. Кутузов^а, Т.М. Татарникова^б

^а Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

^б Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: tm-tatarn@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.03.17, принята к печати 12.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К анализу парадигм имитационного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 552–558. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558

Аннотация

Предмет исследования. Обсуждены особенности реализации продвижения системного времени в существующих парадигмах имитационного моделирования: дискретно-событийного, динамического, системной динамики и мультиагентного подхода. В моделях с непрерывными процессами предложено выбирать значение шага продвижения во времени в соответствии с теоремой Найквиста–Котельникова. **Используемые подходы.** Назначение шага продвижения системного времени осуществляется исходя из циклической дискретизации с постоянным Δt или случайным шагом. Фиксированный шаг используется при динамическом моделировании, системной динамике. При дискретно-событийном и агентном моделировании используют как фиксированный, так и случайный шаги продвижения системного времени. При построении «движителя» системного времени применяют две основные схемы построения алгоритмов моделирования – схема событий и схема процессов, первая используется при дискретно-событийном моделировании, вторая – при мультиагентном моделировании. В обоих вариантах продвижение системного времени выполняется по принципу «особых» моментов. Для определения очередного «особого» момента используется календарь, в котором для каждого типа события указан ближайший момент выполнения этого события. **Основные результаты.** Показано единство четырех парадигм имитационного моделирования – дискретно-событийного, динамического, системной динамики и мультиагентного. Обоснован формализованный подход к выбору шага продвижения системного времени. Выполнено сравнение схемы событий и процессов, реализующие разные подходы к построению моделирующего алгоритма. **Практическая значимость.** Единство подходов способствует реализации интегрированной среды имитационного моделирования. Рекомендации по выбору шага продвижения системного времени, приведенные в работе, позволяют ускорить процесс моделирования и экономить вычислительные ресурсы.

Ключевые слова

имитационное моделирование, симулятор, шаг продвижения системного времени, календарь событий, схема процессов и событий, моделирование случайностей, ускорение

ON THE SIMULATION PARADIGM ANALYSIS

O.I. Kutuzov^a, T.M. Tatarnikova^b

^a Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: tm-tatarn@yandex.ru

Article info

Received 05.03.17, accepted 12.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558

Article in Russian

For citation: Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. On the simulation paradigm analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 552–558 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558

Abstract

Subject of Study. We discuss implementation features of the system time promotion in existing simulation paradigms: discrete event, dynamic, system dynamics and multi-agent approach. In the models with continuous processes the value of the promotion step in time is proposed to be chosen according to the Nyquist-Kotelnikov theorem. **Methods.** The assignment

of the system time promotion step is based on cyclic sampling with a constant Δt or a random step. A fixed step is used for dynamic modeling and system dynamics. With discrete-event and agent modeling, both fixed and random steps of the system time promotion are used. When constructing the "mover" of the system time, two main schemes for creation of modeling algorithms are used: the scheme of events and the scheme of processes; the first scheme is used for discrete-event modeling, and the second one for multi-agent modeling. In both cases, the promotion of the system time is performed according to the principle of "special" moments. To determine the next "special" moment, a calendar is used where the closest time of this event is specified for each type of event. **Main Results.** We have shown the unity of four simulation modeling versions: discrete-event, dynamic, system dynamics and multi-agent. We have substantiated a formalized approach to the choice of the system time promotion step. The schemes of events and processes are compared, realizing different approaches to modeling algorithm creation. **Practical Relevance.** The unity of paradigms contributes to the implementation of the integrated simulation environment. Recommendations for choosing a step in the system time promotion, given in the paper, enable to speed up the process of modeling and save computing resources.

Keywords

simulation modeling, simulator, system time promotion step, events calendar, scheme of processes and events, randomness simulation, acceleration

Введение. Сущность парадигм имитационного моделирования

Имитационное моделирование (ИМ) при современном уровне развития информационных технологий переживает второе рождение [1]. В практической реализации оно опирается на четыре парадигмы: дискретно-событийное моделирование, динамическое моделирование, системная динамика в смысле Форрестера и мультиагентный подход [2, 3].

В *дискретно-событийном моделировании* функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Событие происходит в определенный момент времени и сопровождается изменением состояния системы. Продвижение системного времени реализуется посредством программирования симулятора – «движителя» времени. Симулятор воспроизводит во времени смену состояний объекта моделирования, отображая, таким образом, действие механизма причинно-следственных связей. Имитация сводится к заданию начального состояния системы, пуску симулятора и наблюдению за воспроизведением траектории моделируемого объекта в пространстве смены его состояний.

Дискретно-событийный способ применяется для моделирования процессов, присущих информационным и телекоммуникационным сетям, системам с отказами и восстановлением элементов, дискретным производством и т.п. [4].

Динамическое моделирование применяется для моделирования процессов, описываемых дифференциальными уравнениями, представленными в форме Коши [5], которые решаются численными методами с автоматическим подбором шага по времени. В дифференциальных уравнениях значения переменных в конце интервала времени $[t, t+dt]$ выражаются через их значения относительно начала интервала времени так, как это определяется причинно-следственными связями, действующими в системе.

При компьютерной имитации символьные бесконечно малые приращения dt заменяются численными конечными приращениями времени Δt , и имитация системы выполняется в дискретном времени. Траектория смены состояний моделируемого объекта определяется действием учитываемых моделью причинно-следственных связей. Выбор значения шага Δt не связан с принципом имитации и обусловлен динамикой моделируемых процессов.

Таким образом, логика так называемого «непрерывного» динамического моделирования в части механизма продвижения во времени совпадает с логикой дискретно-событийного моделирования.

В *системной динамике* структурными элементами модели являются уровни и темпы. Уровни обладают накопительным свойством (накопители). Темпы играют роль скоростей и характеризуют потоки, входящие и выходящие из накопителей. Взаимодействие в модели отображается непрерывными процессами, представленными в виде уравнений в конечных разностях [6]. В плане обеспечения имитации системная динамика отличается от «непрерывного» динамического моделирования лишь формализацией. В системной динамике отсутствует промежуточная фаза описания объекта на языке дифференциалов. Объект отображается в виде совокупности условно независимых сетей.

Шаг Δt в системе разностных уравнений уровней системной динамики можно рассматривать как шаг смены значений уровней и потоков во времени.

Мультиагентное моделирование исследует поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом [7]. Агенты – это объекты модели, интерпретируемые как независимые активные сущности. Поведение агентов определяется на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»). Агент – это, по сути, атомарный процесс – последовательность событий и работ, описывающая поведение во времени какого-либо объекта в моделируемой системе. Действия агентов имитируются в модели точно так же, как и любые другие события – как прямые следствия из достигнутого состояния системы. И модельное время продвигается симулятором строго вперед, в точном соответствии с механизмом причин и следствий [8].

Во всех рассмотренных четырех версиях ИМ симулятор продвигает вперед системное время и создает на каждом очередном шаге текущий временной слой системы. Этот слой содержит сведения о возможных ближайших предстоящих и последних произошедших изменениях для рекуррентного пересчета показателей. Симулятор продвигает этот временной слой вперед в модельном времени вдоль множества фактов отслеживаемой им причинно-следственной цепи и достигает заданных целей. Этот принцип и является сущностью компьютерного ИМ.

Следовательно, все четыре «парадигмы» – по сути, просто разные реализации ИМ, разные подходы к построению траекторий смены состояний. Все они используют причинно-следственный механизм продвижения процессов во времени. Различия относятся лишь к выбору того или иного набора базовых математических и программных объектов, а логика имитации процессов одинакова. Построение траектории функционирования моделируемого объекта выполняется продвижением системного времени. Это возможно реализовать как с детерминированным шагом Δt , так и с шагом случайной длительности.

В моделях с непрерывными процессами продвижение во времени (пересчет значений переменных величин в ходе модельного времени), осуществляется в имитационной модели по «принципу малых Δt » [9]. Но насколько «малых»? Можно ли формализовать подход к выбору величины шага « Δt »?

Принципы продвижения системного времени

В технике связи в основе соответствия между непрерывными и дискретными сигналами лежит теорема Найквиста–Котельникова [10], которая обосновывает представление (передачу) аналоговых сигналов отдельными выборочными значениями через шаг

$$\Delta t = 1/2F_{гр},$$

где $F_{гр}$ – граничная частота; частота, ограничивающая сверху эффективную полосу спектра аналогового сигнала. Частотная характеристика является отличительным признаком любой динамической системы. В этой связи такой подход к назначению шага Δt применяется и при ИМ динамических систем.

Поскольку доля частотного спектра, примыкающего к этой граничной частоте, очень мала по сравнению с областью более низких частот этого ограниченного спектра, то возникает много участков в дискретной интерпретации аналогового сигнала, в которых последовательные выборочные значения практически не отличаются друг от друга. По этой причине, например, в технике связи от циклической дискретизации с шагом Δt перешли к адаптивной дискретизации со случайным шагом.

При адаптивной дискретизации относительно представленного (переданного) значения выставляется некоторая зона (апертура), и очередное выборочное значение берется (передается) через временной интервал, когда это значение отклоняется от предыдущего, представленного (переданного) в большую или меньшую сторону, на величину, превышающую значение апертуры. Это и задает случайный шаг между представляемыми (передаваемыми) значениями (событиями!) аналогового сигнала. Такую связь между непрерывным и дискретным имеем во всех четырех «парадигмах» ИМ. И если фиксированный шаг используется при динамическом моделировании, системной динамике, то при дискретно-событийном и агентном моделировании используют как фиксированный, так и случайный шаги продвижения системного времени [9].

При построении «движителя» системного времени применяют две основные схемы построения алгоритмов моделирования – схема событий и схема процессов. Схема событий используется при дискретно-событийном моделировании, а схема процессов – при мультиагентном моделировании. И в той, и в другой схеме для продвижения системного времени применяется принцип «особых» моментов [9]. Чтобы компьютер мог вычислить очередной «особый» момент, используется календарь, в котором для каждого типа события указан ближайший момент, когда такое событие произойдет. По календарю определяется очередной особый момент как наименьший из моментов, записанных в календаре.

Сопоставим схему событий и схему процессов.

Схема событий более стройна: события не пересекаются, за один шаг имитируется одно событие, события имитируются в хронологическом порядке, алгоритм шага делится на этапы с четким функциональным назначением (имитация события, пополнение статистик, планирование новых событий). Основная трудность при разработке модели по схеме событий – в сложных ситуациях довольно трудно сформировать перечень типов событий и правильно разработать соответствующие им части алгоритма так, чтобы не упустить каких-то нужных элементарных событий и правильно учесть взаимосвязи.

Схема процессов не требует при разработке алгоритма учитывать сразу все, что может происходить в системе, а допускает отдельную разработку отдельных процессов. Особенно упрощается разработка имитационных моделей при использовании готовой системы моделирования, когда пользователю требуется только описать последовательность событий и работ в процессах, а учет взаимодействия процессов, сбор статистики, управление порядком имитации процессов берет на себя система моделирования. Однако схема процессов не позволяет выделить функционально различные части алгоритма: пополнение статистик и планирование событий исследуют с операциями смены состояний в рамках одной фазы процесса. Это чревато упущениями при разработке алгоритма.

На этапе начального обучения моделирования и при моделировании простых систем целесообразно применять схему событий, а при моделировании сложных систем с использованием универсальных средств предпочтительнее схема процессов.

Дополним приведенное сопоставление этих двух схем построения моделирующего алгоритма количественной характеристикой на примере модели виртуального канала (ВК). ВК представляет собой коммутационный канал, обеспечивающий транспортировку пакетов между двумя портами сети, т.е. является некоторым маршрутом в сети, состоящим из последовательности n узлов коммутации (УК) и $(n-1)$ каналов связи (КС), по которому осуществляется передача информации из узла – источника $УК_1$ в узел – адресат $УК_n$.

Особенностью имитационной модели ВК является отображение фоновых потоков, циркулирующих по сети и влияющих на процесс прохождения пакетов по выделенному (моделируемому) пути. Узлы в моделирующей программе ВК представляются тремя модулями. Первый обеспечивает возникновение требований к передаче пакетов; второй реализует коммутацию пакетов; третий – передачу пакетов следующему узлу.

Положим, пакет выделенного потока поступил в устройство в момент t_j^B , и спланирован момент t_{j+1}^B очередного следующего поступления пакета выделенного потока через интервал y . Интервалы между поступлениями пакетов выделенного потока есть реализации случайной величины, распределенной экспоненциально с параметром λ_B .

Помимо выделенного потока, на тот же вход устройства поступает фоновый пуассоновский поток с параметром λ_Φ . В календаре событий записываются моменты времени поступлений транзактов обоих потоков.

Если за интервал y между моментами t_j^B и t_{j+1}^B поступлений транзактов выделенного потока не поступало транзактов фонового потока, то для продвижения транзакта t_{j+1}^B (взятия на обслуживание, постановки в очередь и т.п.) потребуется однократное обращение к календарю. Вероятность отсутствия поступления транзактов фонового потока на интервале (t_j^B, t_{j+1}^B) есть

$$P(1) = \frac{(\lambda_\Phi y)^0}{0!} e^{-\lambda_\Phi y}.$$

Соответственно, если за интервал (t_j^B, t_{j+1}^B) поступает n транзактов фонового потока, моменты поступлений которых опережают момент t_{j+1}^B , то в такой ситуации для продвижения транзакта выделенного потока потребуется $(n+1)$ обращений к календарю. Вероятность такого количества обращений есть

$$P(n+1) = \frac{(\lambda_\Phi y)^n}{n!} e^{-\lambda_\Phi y}.$$

Условное математическое ожидание числа обращений к календарю для продвижения одного транзакта выделенного потока в одном устройстве при наличии фонового потока определим как

$$\xi(y) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) P(n) = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{(\lambda_\Phi y)^n}{n!} e^{-\lambda_\Phi y} = 1 + \lambda_\Phi y.$$

Усредняя по y , получим среднее значение обращений к календарю для продвижения одного транзакта выделенного потока в одном устройстве при наличии фонового потока в виде

$$i = \int_0^{\infty} (1 + \lambda_\Phi y) \cdot \lambda_B e^{-\lambda_B y} dy = 1 + \frac{\lambda_\Phi}{\lambda_B}.$$

Положим, типовая операция продвижения транзактов выделенного потока осуществляется в многофазной системе, какой является модель виртуального канала. Пусть модель включает N узлов. Тогда виртуальный календарь такой многофазной системы для продвижения транзакта по виртуальному каналу будет содержать

$$\bar{\xi} = N \cdot \left(1 + \frac{\lambda_\Phi}{\lambda_B} \right) \tag{1}$$

мест для записи особых моментов.

При реализации обращений к выделенному первому узлу параллельно выполняются обращения к общему календарю для продвижения транзактов и по другим узлам ВК. Можно принять, что в этом случае для каждого последующего j -го узла размер календаря как бы «сужается» и принимает значение

$$g_j = (N - j + 1) \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{\Phi}}{\lambda_{\Psi}} \right), \quad j = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Полагаем, что относящиеся к отдельному какому-либо узлу (узлы считаем идентичными) моменты особых состояний распределены равномерно в ряде общих мест календаря. Тогда среднее число обращений к общему календарю при продвижении транзакта на j -ом узле, обеспечивающее выборку $i = 1 + \lambda_{\Phi}/\lambda_{\Psi}$ значений, можно оценить формулой

$$\bar{\eta}_j = \frac{1}{C_{g_j}^i} \sum_{m_1=1}^{g_j-(i-1)} \sum_{m_2=m_1+1}^{g_j-(i-2)} \dots \sum_{m_i=m_{i-1}+1}^{g_j} (m_1 + m_2 + \dots + m_i), \quad (3)$$

где g_j определяется формулой (2).

Таким образом, по схеме событий для продвижения транзакта выделенного потока на один шаг по цепочке ВК из N узлов потребуется выполнить в среднем следующее число обращений к общему календарю:

$$\bar{\eta} = \sum_{j=1}^N \bar{\eta}_j, \quad (4)$$

где $\bar{\eta}_j$ определяется формулой (3).

Итак, при продвижении транзакта выделенного потока в многофазной системе (ВК), состоящей из N узлов, оценку среднего числа обращений к общему календарю при построении алгоритма моделирования по схеме событий дает формула (4) и, соответственно, формула (1) при построении алгоритма моделирования по схеме процессов. Соотношение этих средних $\alpha = \bar{\eta}/\bar{\xi}$ можно рассматривать как частный количественный критерий эффективности одной схемы построения алгоритма моделирования по отношению к другой. В таблице представлены некоторые численные значения α анализируемого сопоставления названных схем.

N	$\lambda_{\Phi}/\lambda_{\Psi}$			
	3	5	7	9
1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,55	1,97	2,40	2,84
3	2,60	3,53	4,47	5,42
4	4,05	5,60	7,19	8,78

Таблица. Сравнительные оценки схемы процессов и событий

По схеме событий на каждом очередном шаге выполняется то особое состояние, время наступления которого – ближайшее к текущему моменту. При этом на каждом шаге возможен переход к любому из программных модулей. А это, в свою очередь, влечет вызов другой структуры данных, соответствующей типу особого состояния.

Схема процессов обеспечивает переход к нужному модулю и позволяет выполнять несколько последовательных особых состояний при очередном переходе к определенному модулю, что, как показывают приведенные расчеты, существенно сокращает число обращений к календарю событий и тем самым ускоряет процесс моделирования. С другой стороны, в схеме процессов число процессов не постоянно: некоторые из них появляются, например, очереди или заявки, а потом исчезают. В связи с этим невозможно заранее определить объем календаря, и приходится под каждый процесс отводить заведомо больше ресурсов памяти. Схема процессов удобно реализуется с использованием объектно-ориентированного подхода, который широко применяется при построении мощных инструментальных систем моделирования, как например, система AnyLogic [11].

Прежде чем объект моделирования будет отображен программной имитационной моделью, для него формируется концептуальная модель и формализованное представление объекта в виде адекватной математической модели. Программная модель реализует численный эксперимент с этой математической моделью.

Моделирование случайностей

При моделировании стохастических систем парадигма ИМ включает две составляющие: симулятор – «движитель», реализующий продвижение системного времени, и метод Монте-Карло, обеспечивающий разыгрывание «случайностей» [12]. В совокупности эти две составляющие и строят траектории – реализации функционирования моделируемой системы, в которой присутствуют случайные факторы и объекты. Обе составляющие наличествуют во всех четырех подходах ИМ.

ИМ с учетом влияния случайных факторов сопряжено с многократным воспроизведением возможных вариантов развития процессов. Многократность позволяет получить полосу наиболее вероятных

траекторий для статистических оценок искомых показателей. Точность получаемых оценок характеризует точность ИМ, как меру соответствия численного решения, получаемого с помощью ИМ, точному решению поставленной математической задачи.

Известный недостаток метода Монте-Карло заключается в его медленной сходимости, который особенно проявляется при моделировании редких событий и в задачах большой размерности. И здесь особенно актуальным становится проблема ускорения ИМ с использованием метода Монте-Карло за счет сокращения количества численных экспериментов.

Общей стратегией снижения цены точности является ускорение сходимости вычисляемых оценок. Ускорение может достигаться:

1. за счет соответствующего аналитического преобразования решаемой задачи [13];
2. системотехническими методами ускорения расчетов, в частности, путем организации параллельных вычислений и распределенного моделирования [14].

Наибольшего эффекта удается достичь тогда, когда методы ускорения учитывают специфику моделируемых объектов, решаемых задач и алгоритмов их решения. Так, например, в [14, 15] оба названных подхода к ускорению ИМ развиваются и излагаются применительно к задачам моделирования инфокоммуникационных сетей. Теоретической основой ускоренного аналитико-имитационного моделирования сетей являются методы расслоенной выборки, равновзвешенного моделирования, элементы теории экстремальных статистик.

Заключение

В работе представлен анализ четырех объектно-ориентированных подходов имитационного моделирования – дискретно-событийного моделирования, динамического моделирования, системной динамики и мультиагентного моделирования. Различия относятся к выбору того или иного набора базовых математических и программных объектов, а логика имитации процессов одинакова. Построение траектории функционирования моделируемого объекта во всех четырех подходах выполняется продвижением системного времени. Этот принцип и является сущностью компьютерного имитационного моделирования.

Назначение шага продвижения системного времени осуществляется исходя из циклической дискретизации с детерминированным шагом Δt и шагом случайной длительности.

В моделях с непрерывными процессами предлагается выбирать значение шага продвижения во времени в соответствии с теоремой Найквиста–Котельникова. Если фиксированный шаг применяется при динамическом моделировании и системной динамике, то при дискретно-событийном и агентном моделировании в зависимости от постановки задачи моделирования используют как фиксированный, так и случайный шаги продвижения системного времени.

При построении симулятора независимо от способа назначения шага применяют две схемы построения алгоритмов моделирования – схему событий и схему процессов, сравнение которых на примере модели виртуального канала показало преимущество схемы процессов по числу обращений к календарю событий.

Таким образом, переход в имитационном моделировании от одного из четырех подходов к другому, например, от дискретно-событийного подхода к мультиагентному и т.п., не является, по сути, сменой парадигм. Более того, в практической реализации задач моделирования осуществляется гибкий переход между рассмотренными методами. Интегрированная среда может включать модельные агенты, управляемые в духе подхода Дж. Форрестера, или массовые потоки дискретных событий, обобщаемые как уровни и потоки системной динамики [3]. Объединенная логика имитационного моделирования открывает путь к фабрикам имитационных моделей, первые образцы которых уже существуют [10].

Литература

1. Лычкина Н.Н. Инновационные парадигмы имитационного моделирования и их применение в сфере управленческого консалтинга, логистики и стратегического менеджмента // Логистика и управление цепями поставок. 2013. №5(58). С. 28–41.
2. Задорожный В.Н., Семёнова И.И. Управление сложными техническими объектами и парадигмы имитационного моделирования // Омский научный вестник. 2006. № 2(35). С. 102–108.
3. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D.M. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. Prentice Hall, 2009. 638 p.
4. Бражник А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS WORLD. СПб.: Реноме, 2006. 439 с.
5. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. 3-е изд. СПб.: BHV, 2004. 847 с.
6. Форрестер Дж. *Мировая динамика*. М.: АСТ, 2003. 379 с.
7. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of

References

1. Lychkina N.N. Innovative paradigms of simulation modeling and their application in the field of management consulting, logistics and strategic management. *Logistika i Upravlenie Tsepyami Postavok*, 2013, no. 5, pp. 28–41.
2. Zadorozhnyi V.N., Semenova I.I. Control of complex technical objects and simulation paradigm. *Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 2, pp. 102–108. (In Russian)
3. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D.M. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. Prentice Hall, 2009, 638 p.
4. Brazhnik A.N. *Simulation Modeling: GPSS WORLD Capabilities*. St. Petersburg, Renome Publ., 2006, 439 p. (In Russian)
5. Law A.M., Kelton W.D. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, 1991.
6. Forrester J.W. *Industrial Dynamics*. MIT Press, 1961.
7. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of requests through the network by transferring them over multiple

- requests through the network by transferring them over multiple paths // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 601. P. 199–207. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2_21
8. Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Попцова Н.А., Паршутин С.А., Воронина Д.А., Богатырев С.В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 5(105). С. 831–838. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
 9. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2007. 343 с.
 10. Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. М.: Академия, 2010. 329 с.
 11. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 403 с.
 12. Поляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на ЭВМ. М.: Советское радио, 1971. 400 с.
 13. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Из практики применения метода Монте-Карло // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. №3. С. 65–70.
 14. Олзоева С.И. Распределенное моделирование в задачах разработки АСУ. Улан-Удэ, Изд-во ВСГТУ, 2005. 219 с.
 15. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик. СПб.: ГУАП, 2015. 381 с.
 - paths. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 601, pp. 199–207. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2_21
 8. Bogatyrev V.A., Karmanovsky N.S., Poptcova N.A., Parshutin S.A., Voronina D.A., Bogatyrev S.V. Simulation model for design support of infocomm redundant systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 831–838. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
 9. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modeling of Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2007, 343p. (In Russian)
 10. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Theory of Electrical Communication*. Moscow, Akademiya Publ., 2010, 329 p. (In Russian)
 11. Karpov Yu.G. *Simulation Modeling of Systems. Introduction to Modeling with AnyLogic 5*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 403 p. (In Russian)
 12. Polyak Yu.G. *Probabilistic Modeling with a Computer*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1971, 400 p. (In Russian)
 13. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Practical Experience of Using Monte Carlo Method. *Industrial Laboratory*, 2017, vol. 83, no. 3, pp. 65–70. (In Russian)
 14. Olzoeva S.I. *Distributed Modeling in Problems of Control Systems Development*. Ulan-Ude, VSGTU Publ., 2005, 219 p. (In Russian)
 15. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Infocommunication Networks. Simulation and Evaluation of Probability-Time Characteristics*. St. Petersburg, SUAI Publ., 2015, 381 p. (In Russian)

Авторы

Кутузов Олег Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, kutuzov-oleg@mail.ru

Татарникова Татьяна Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, tm-tatarn@yandex.ru

Authors

Oleg I. Kutuzov – D.Sc., Full Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, kutuzov-oleg@mail.ru

Tatiana M. Tatarnikova – D.Sc., Associate professor, Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, tm-tatarn@yandex.ru