

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274

SIMULATION IN THE TASKS OF SEA PORT OPERATIONAL ANALYSES

A.L. Kuznetsov¹, A.V. Kirichenko¹, V.N. Shcherbakova-Slyusarenko²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

The current stage of the development of the technology for the design of complex production objects, which the sea ports and terminals undoubtedly included in this category, assumes the intensive use of the computerization and modern discrete mathematics as the part of artificial intelligence. Many specialists regard the design and project as a procedure as the guided data transformation. The size and complexity of data sets exclude the possibility of manual implementation of this procedure and data contingency maintaining. The parallel development of the simulation theory, software platforms for the relevant implementation and practice of the products' utilization in design caused serious gaps in terminology and interpretation of key concepts. Starting as a minor methodological inconvenience, this divergence gradually has developed into a serious obstacle for the practical implementation, since the users, the designers and model developers ceased to understand each other. Ever and ever advanced and sophisticated software tools for the simulation, increasing interest of the specialists in the computer sciences create new possibilities that do not correspond to the level of practical utilization of the simulation models. Besides the difficulties with the outlaying of the hopes and expected results of the simulation, the problem is in the absence of the universal and generally acknowledged means for the adequacy proving. The simulation models could serve as very powerful and efficient tool for the investigation of the object's properties, but only under condition that they properly reflect the real object and not its analogue, close or distant. The paper displays the separate phases of the model's development over a specially selected example. Different methodological paradigms are combined into a toolkit that provides a designated succession of models inheriting their main features. Every stage has its own goals, tasks and limitations that are identified by the study, as well as the regular procedure of adequacy proof is discussed.

Keywords: port operations, simulation models, model adequacy.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

УДК 656.615

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ОПЕРАЦИЙ В МОРСКИХ ПОРТАХ

А. А. Кузнецов¹, А. В. Кириченко¹, В. Н. Щербакова-Слюсаренко²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

Нынешний этап развития технологии проектирования сложных производственных объектов, к которым в полной мере относятся морские и сухопутные грузовые терминалы, невозможен без использования современной вычислительной техники и дискретной математики. Проектирование многими специалистами рассматривается как процедура направленного преобразования данных, рост объема которых и требование поддержания их непротиворечивости без информационных технологий делает реализацию данной проблемы нереальной. Параллельное развитие теории моделирования, программной среды его

реализации и практики использования его в проектировании привели к значительным несоответствиям в терминологии и интерпретации основных используемых понятий. Из сугубо методической проблемы это расхождение постепенно стало превращаться в серьезное препятствие для практического внедрения, поскольку заказчики, проектировщики и создатели моделей перестали понимать друг друга. Все более развитые программные средства создания моделей и усиливающийся интерес специалистов в области создания программного продукта создают возможности, которые в значительной мере не соответствуют уровню практического использования моделей. Кроме затруднений с определением границ возможности и перечня ожидаемых от моделирования результатов, проблему создает отсутствие единообразных средств установления адекватности моделей. Модели являются мощным и эффективным способом изучения свойств проектируемого или исследуемого объекта, но лишь при условии, что они действительно отражают именно его свойства, а не какого-либо аналога, близкого или далекого от реальности. В статье на специально выбранном примере операции рассматриваются отдельные фазы создания имитационной модели, основанные на использовании различных парадигм общей теории. Устанавливаются цели и ограничения каждого из этапов, а также соответствующих им методов, описывается процедура формального установления адекватности создаваемой серии моделей.

Ключевые слова: портовые операции, имитационное моделирование, адекватность.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

Введение (Introduction)

В настоящее время математическое моделирование является неотъемлемой частью большинства проектов, связанных с проектированием, созданием и эксплуатацией технических объектов. В сфере портовых технологий это отмечается в работах [1] – [4]. Бурное развитие вычислительной техники, дискретной математики и методологии программирования привело к появлению бесчисленного количества методов и программных средств, формы и суть которых создают значительные трудности даже для их классификации. Наиболее известные платформы для моделирования портовых операций описаны в публикациях [5], [6].

Указанная проблема обнаруживается как в целом, так и в отдельных частях, например, в имитационном моделировании, которое является наиболее интенсивно развивающейся и глубоко исследуемой дисциплиной, предлагает много различных определений и оснований классификации, во многом противоречивых и спорных. Все это приводит к тому, что сформировавшиеся у различных специалистов и в разных школах представления переносятся на смежные области без необходимой корректировки и изменения интерпретации, в лучшем случае внося путаницу в терминологию и методологию создания прикладных моделей, в худшем случае модели утрачивают адекватность, понимаемую как совпадение свойств (функций / параметров / характеристик и т. п.) модели и соответствующих свойств моделируемого объекта. Сохранение или утрату адекватности необходимо доказывать, поскольку не имеющая этого свойства модель не представляет никакой ценности, гносеологической или практической, что указывалось в работах [7] и [8].

В данном исследовании не ставится задача наведения порядка в классификации методов имитационного моделирования, эта проблема находится далеко за пределами практической сферы, приближаясь, в некотором смысле, к теоремам Гёделя о неполноте. Наличие разнообразных и зачастую противоречивых толкований одних и тех же терминов подтверждает анализ работ [9] – [11]. Проблема согласования различных интерпретаций в современной международной логистике и портовых операциях рассмотрена в работе [12], где ставится и решается задача практической классификации систем имитационного моделирования, используемых для анализа операций различной природы, в основном связанных с транспортно-логистической сферой. Построенная классификация предлагает одновременно и способ доказательства адекватности моделей, создаваемых в предлагаемой парадигме. Все рассуждения иллюстрируются примерами, для нагляд-

ности которых они касаются одной операции. Реальное моделирование на всех стадиях процесса выполняется для полной совокупности операций, составляющих функциональное назначение моделируемого объекта, но описание конкретных реализаций подобных проектов выходит за рамки этой работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть некоторое оборудование имеет часовую производительность операций $p_{\text{ч}}$, а расчетный годовой объем операций составляет величину $Q_{\text{год}}$. Необходимо получить ответы на следующие вопросы: *сколько единиц оборудования потребуется для выполнения этого задания? Какой метод следует использовать для ответа на этот вопрос?*

В первом приближении ответ может быть найден следующим образом: год насчитывает 365 сут и среднесуточный объем требуемых операций составит $Q_{\text{сут}} = \frac{Q_{\text{год}}}{365}$. В сутках имеется 24 ч, и среднечасовой объем операций составит $Q_{\text{ч}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{24}$. Отсюда искомое значение требуемого количества оборудования составит величину $N = \frac{Q_{\text{ч}}}{p_{\text{ч}}}$.

В то же время расчетный годовой грузопоток может складываться из отдельных суточных значений, колеблющихся вокруг некоторого среднесуточного значения (рис. 1).

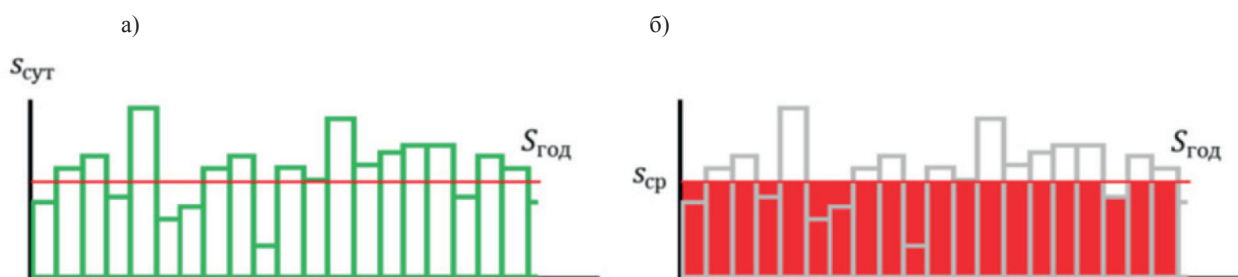


Рис. 1. Среднесуточные значения как случайная (а) и детерминированная (б) величина

В проведенных расчетах случайная величина заменена ее средним значением, поскольку математический аппарат работы с формулами, использующими в качестве переменных случайные величины, отсутствует. То же самое относится и к часовой производительности в каждые сутки: это будет случайная величина, колеблющаяся вокруг среднечасового значения, которое, как было установлено ранее, само является случайной величиной (рис. 2). Отсюда следует, что требуемое количество оборудования в каждый отдельно взятый час также является случайной величиной, которая будет определяться суперпозицией распределений суточных и часовых потребностей в выполнении операций. Кроме того, случайной величиной может оказаться и часовая производительность единицы оборудования $p_{\text{ч}}$. В то же время требуемое количество оборудования в большинстве случаев является детерминированной величиной, значение которой должно быть выбрано исходя из свойств соответствующей случайной величины.

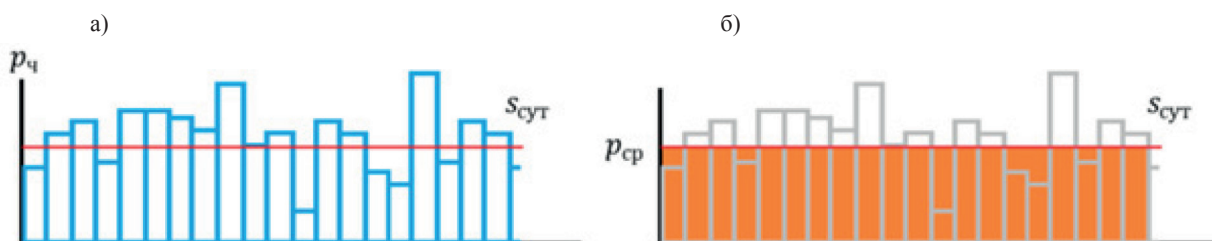


Рис. 2. Среднесуточные значения случайной (а) и детерминированной (б) величин

Свойства случайной величины (требуемого количества оборудования, определяемого исходя из случайной часовой потребности в нем) могут учитываться при переходе к детерминированному значению различным образом. Если задача ставится так, что поступающие часовые заявки на выполнение операций могут становиться в очередь и дожидаться освобождения занятого оборудования сколь угодно долго, то в данном случае арифметического расчета средних значений количества оборудования будет вполне достаточно. Ценой за это будет появление очереди на обслуживание, длина которой будет являться случайной величиной, производной от главной случайной величины — требуемого часового количества оборудования.

Если задача ставится так, что процедуру обслуживания должны пройти все поступившие в этот час заявки, то требуется найти максимально возможное значение базовой случайной величины — требуемого часового количества оборудования. Если задача состоит в нахождении определенного баланса между ожиданием заявок в очереди (вследствие мгновенного дефицита оборудования) и простоем оборудования (вследствие его мгновенного дефицита), то необходимо получить распределение базовой случайной величины. Очередь заявок может быть ограничена по длине или временем ожидания, что также определяется статистическими свойствами базовой случайной величины. Как следствие, для всех задач, в той или иной степени, требуется знание закона распределения базовой случайной величины — требуемого часового количества оборудования.

Методы статистических испытаний (методы Монте-Карло). Пусть известна функция распределения случайной величины X или $F(x) = P(X < x)$. Областью определения для нее являются возможные значения случайной величины, областью значений — интервал от 0 до 1. Если генерировать случайные числа, равномерно распределенные на этом интервале, и находить для каждого из них прообраз из области определения функций, то «гуще» эти значения будут располагаться там, где кривизна функции распределения больше (рис. 3).

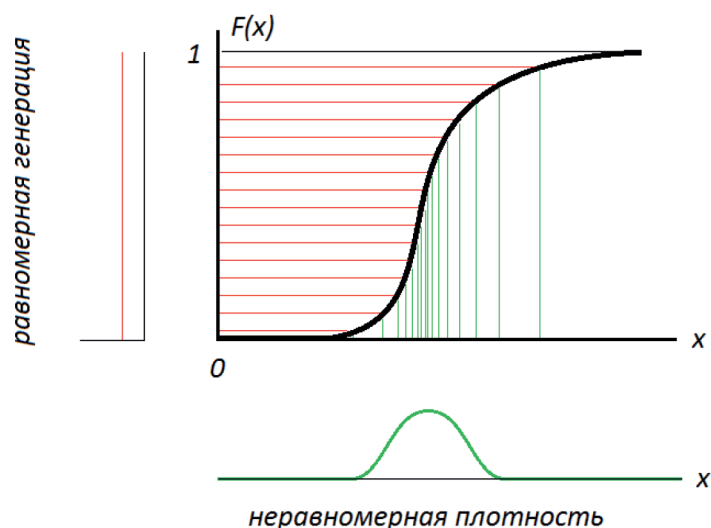


Рис. 3. Получение значений случайной величины по заданному закону

С ростом числа проведенных опытов частота наблюдаемых в результате значений будет приближаться к плотности вероятности исходной случайной величины. Этот метод называется *методом обратной функции*, поскольку значения случайной величины находятся как значения $F^{-1}(y)$ от генерируемых равномерно распределенных случайных аргументов $y \in [0; 1]$.

Пусть известно также, что расчетный годовой объем составляет 365000 операций. Среднесуточное значение составляет 1000 операций в сутки, что является математическим ожиданием рассматриваемой случайной величины. Если известен предполагаемый закон распределения, то это позволяет генерировать конкретные значения этой величины (рис. 4).

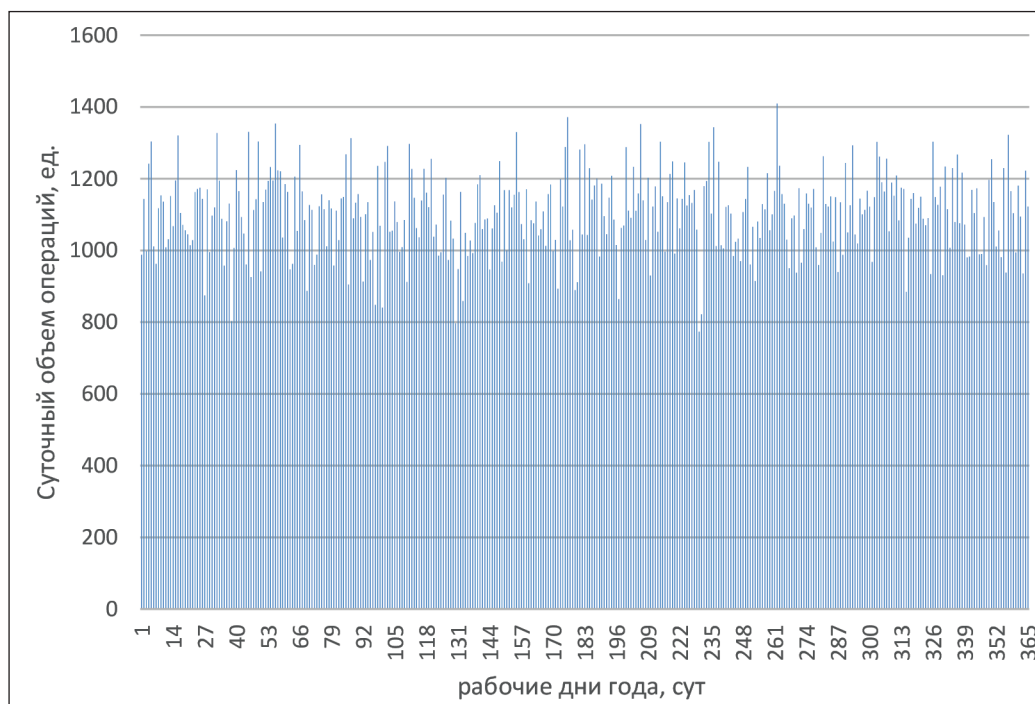


Рис. 4. Генерация суточных объемов операции как случайной величины

В свою очередь, каждое из сгенерированных значений суточного объема является суммой 24 почасовых объемов операций, что позволяет аналогичным образом для каждого отдельного суток сгенерировать распределение требуемого почасового объема операций, которое будет точно так же колебаться вокруг среднего значения в 42 операциях в час. Наконец, генерация случайной величины (часовой производительности единицы оборудования) позволяет пересчитать полученный для каждого часа объем операций в соответствии с требованиями, предъявляемыми к количеству оборудования (рис. 5).

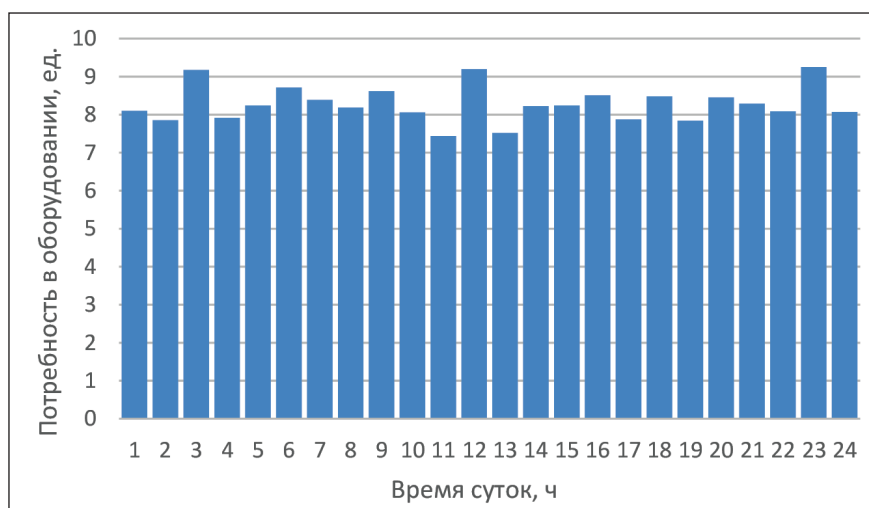


Рис. 5. Оценка потребности в оборудовании по часам одних суток

В рассматриваемом примере средняя часовая производительность была принята на уровне пяти операций в час. Как видно, потребность в оборудовании прогнозируемо колеблется вокруг значения, составляющего чуть более восьми единиц. Если теперь выполнить генерацию 365 суточных значений и для каждого из них сгенерировать 24-часовые потребности, получим 8760 раз-

личных примеров часовой потребности, которые дадут то же число различных значений численности оборудования. При тех же средних значениях генерация значений с большей величиной разброса (задаваемых среднеквадратическим отклонением) будет приводить к увеличению разброса требований к численности оборудования. На рис. 6 приведен пример статистической обработки такого годового эксперимента, откуда видно, что различие требований к численности оборудования от часа к часу может быть достаточно большим: при одних и тех же средних значениях в отдельные часы спрос может в разы превышать средние значения.

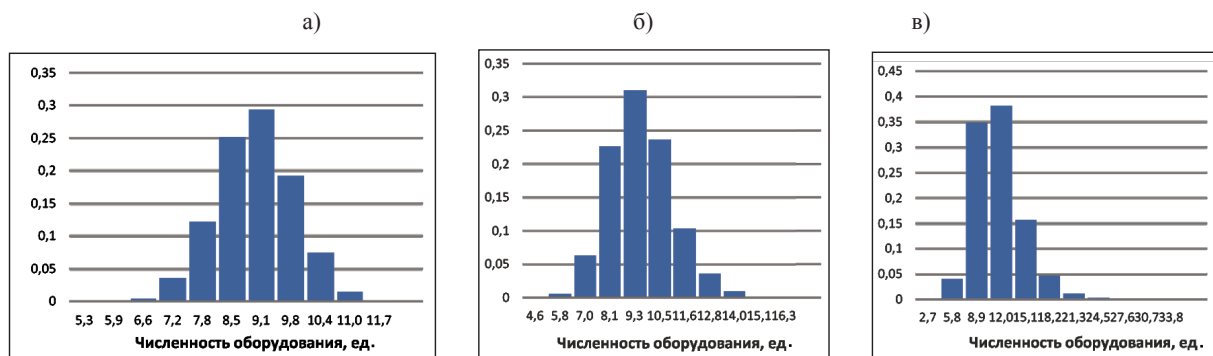


Рис. 6. Оценка частоты потребности в оборудовании при малом (а), среднем (б) и большом (в) разбросе параметров

Кроме того, приведенные ранее рассуждения касались лишь астрономического бюджета времени. Если не все дни года являются рабочими, а в сутках не все часы — рабочими, то требования к численности оборудования будут возрастать. На рис. 7 представлена гистограмма оценки требований к численности оборудования, полученная на основании предположения о 330 рабочих днях и 20 рабочих часах в сутки при среднем разбросе параметров.



Рис. 7. Оценка потребности в оборудовании при реальном бюджете рабочего времени

Если задача состоит в том, чтобы все часовые задания были непременно выполнены, то количество оборудования должно находиться из условия максимума. В то же время, как показывает рис. 7, этот максимум может быть достаточно велик, а его значение может встречаться крайне редко. При распределении для выполнения операций меньшего количества оборудования периодически будет возникать его дефицит и избыток (простой). Размеры этого дефицита при различных выбранных значениях оборудования для выполнения операций показаны рис. 8.

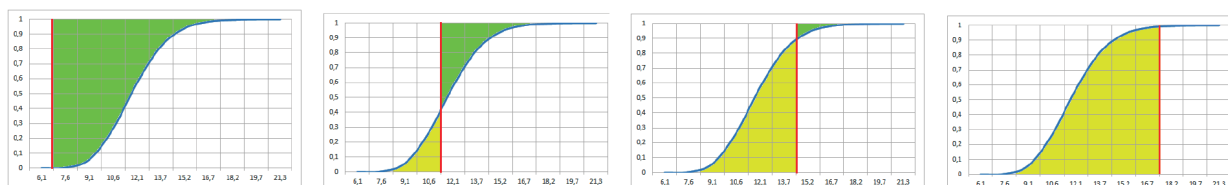


Рис. 8. Дефицит и избыток оборудования при различных установленных количествах

График суммарного объема потерь от дефицита и избытка как функции от численности установленного для совершения операций оборудования приведен на рис. 9.

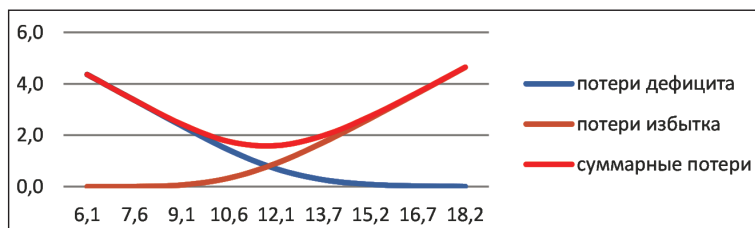


Рис. 9. Суммарные потери от избытка и дефицита оборудования

Минимум суммарных потерь будет определять оптимальную в смысле совокупных потерь численность оборудования. При различных последствиях потерь от дефицита оборудования и его избытка им могут быть приписаны различные веса: $w_1 + w_2 = 1$, которые будут сдвигать суммарную кривую в ту или иную сторону (рис. 10).

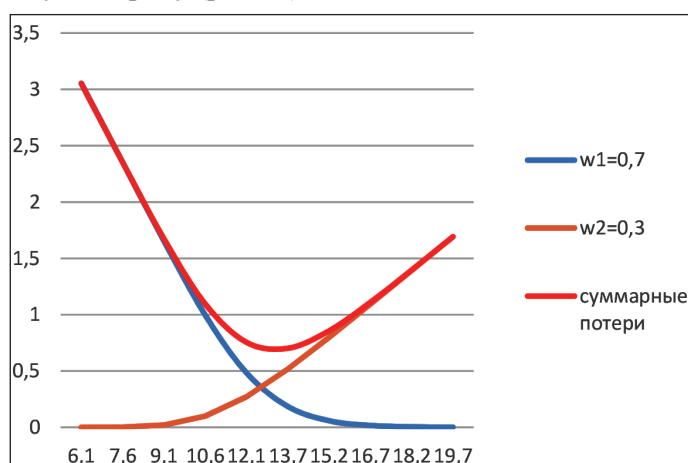


Рис. 10. Взвешенные суммарные потери от избытка и дефицита оборудования

Таким образом, описанные методы статистических испытаний представляют собой варианты исторически первого метода имитационного моделирования — статистических испытаний, или метода Монте-Карло, к недостаткам которого относится необходимость знания законов распределения случайных величин, описывающих параметры моделируемой системы. Кроме того, эти законы предполагаются стационарными, т. е. не меняющимися на протяжении моделируемого периода. Во многих практических случаях это является препятствием для их использования.

Статистическое моделирование методом генерации сценариев. Достаточно часто заданный объем операций обнаруживает определенную периодичность, цикличность или иные особенности. Например, ноябрьские и декабрьские объемы международных перевозок имеют тенденцию к росту из-за рождественской и новогодней торговли, в понедельник и пятницу поток автотранспорта на терминал возрастает из-за выходных, ночью складские операции имеют низкую интенсивность, которая обнаруживает всплески утром и вечером, соответствуя началу и окончанию рабочих смен. Как следствие, адекватная генерация спроса на операции описанными ранее методами оказывается невозможной. Рассмотрение отдельных случаев минимальной, максимальной и типовой интенсивности оказывается слишком субъективным и трудоемким. Кроме того, часто непосредственно законы распределения не могут быть сформулированы в количественных категориях. Мониторинг и экспертные опросы, проводимые как процедура сбора исходных данных для проектирования и моделирования (как его важного этапа), зачастую формулируются в качественных, относительных категориях. Еще большую проблему создает то обстоятельство, что строго де-

терминированные значения присутствуют в расчетных грузопотоках наряду со случайными величинами с известными характеристиками, а также качественными понятиями (например, типа «высокая», «средняя» и «низкая» интенсивность).

Рассмотрим, например, требуемую часовую интенсивность в отдельные сутки. Пусть суточное задание тем или иным образом определено и составляет значение $Q_{\text{сут}}$. Пусть о часовой интенсивности в отдельные сутки будет известно следующее:

- в ряде случаев часовая интенсивность строго определена (детерминирована): например, продиктована необходимостью обработки в тот или иной час секции железнодорожного состава определенной длины и, следовательно, вместимости;

- в ином случае часовая интенсивность может быть оценена средним количественным значением (например, объемом поступающего в тот или иной час на терминал транспорта, обеспечивающего связь с морским портом);

- в иные интервалы интенсивность определяется качественными характеристиками: «высокая», «средняя», «низкая».

Для получения детерминированных числовых значений, которые позволяют выполнять любые математические операции с ними, будем проводить формирование операционного почасового графика в два этапа: на первом этапе формируется предварительный план-график, описывающий временные и количественные показатели суточной операционной деятельности терминала в качественных показателях; на втором — полученный предварительный план-график детализуется до исполнительного плана-графика в числовых значениях.

Оба плана-графика, как предварительный, так и исполнительный, представляют строки, составленные в соответствии с рабочими часами согласно существующим требованиям, предъявляемым к объему операций. В каждом элементе содержится заданная тем или иным способом информация об интенсивности соответствующей операции.

Для формирования предварительного операционного плана-графика выберем следующие символы, кодирующие интенсивность соответствующих операций в тот или иной час рабочего времени:

1. *Детерминированный код* $-N$. В этом случае производительность операций в данный час есть детерминированное значение $P_i = N$.

2. *Среднее значение* N . Кодировка в виде положительного целого значения задает среднее значение производительности операций в данный час МО $[P_i] = N$, вокруг которого колеблются сгенерированные значения с заданным разбросом.

3. *Средние качественные значения* i : «низкая интенсивность», «средняя интенсивность», «высокая интенсивность», $i \in [s, m, l]$. Качественное соотношение между этими категориями задается в параметрах модели в виде числовых отношений натуральных чисел S, M, L .

Формирование исполнительного операционного плана-графика выполняется следующим образом. Если в кодировке предварительного плана-графика использован код $-N$, то интенсивность соответствующей операции в данный час составляет детерминированное значение N . Если в кодировке предварительного плана-графика использован код N , то интенсивность соответствующей операции в данный час составляет случайное значение, распределенное по нормальному закону вокруг значения N . Степень разброса, или вариативность значений параметра, характеризуется задаваемым в параметрах модели среднеквадратическим отклонением. Если в кодировке всего суточного периода для той или иной операции были использованы символы $-N$ и N , то нераспределенным из общего суточного задания W остается объем операций $V = W + \sum (-N) - \sum (N)$. Для распределения объема операций V каждому условному уровню (s, m и l) присваивается вес, задаваемый условными долями.

Пусть уровень s имеет n_s условных долей, уровень m — n_m условных долей, уровень l — n_l условных долей. Цена одной доли, таким образом, может быть рассчитана как $u = \frac{V}{(n_s N_s + n_m N_m + n_l N_l)}$,

где N_i — число символов i в суточной кодировке. Отсюда наличие символа i в кодировке того или иного часа устанавливает среднее значение часовой производительности операций в этот интервал как $P_i = n_i \cdot N_i$. Это значение, как и в предыдущем случае, является средним значением производительности в данный час $MO[P_i]$, вокруг которого колеблются сгенерированные значения с заданным разбросом.

Пример. Пусть суточное задание составляет 1000 единиц, а суточная кодировка интенсивности операций задается последовательностью, приведенной в табл. 1.

Таблица 1

Суточная кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	-25	s	s	m	m	m	m	m	s	s	s	20	s	s	s	m	m	1	1	1	m	s	30	-15

В этом случае нераспределенный объем составит $V = 1000 - 25 - 20 - 30 - 15 = 930$. Пусть относительные веса заданы соотношением $n_s : n_m : n_l = 1 : 3 : 5$. Тогда цена доли составит $u = \frac{930}{(1 \cdot 9 + 3 \cdot 8 + 5 \cdot 3)} u = 30 / (9 \cdot 1 + 8 \cdot 3 + 3 \cdot 5) = 19$. В данном случае кодировка символом s определяет математическое ожидание $19 \cdot 1 = 19$; кодировка символом m — математическое ожидание $19 \cdot 3 = 57$. Средними значениями часовой производительности в рассматриваемом примере будут служить величины, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения часовой производительности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	25	19	19	57	57	57	57	57	19	19	19	20	19	19	19	57	57	95	95	95	57	19	30	15

Вокруг этих средних значений, в соответствии с приведенным ранее алгоритмом формирования исполнительного операционного плана-графика, могут быть сгенерированы случайные значения, например, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Часовая кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	25	19,5	16	57	57	64	56	55	18	20	16	22	20	17	18	62	52	102	86	84	65	18	27	15

Распределение потребности в оборудовании с учетом производительности, понимаемой как случайная величина с тем же значением математического ожидания, равным пяти операциям в час, показано на рис. 11.

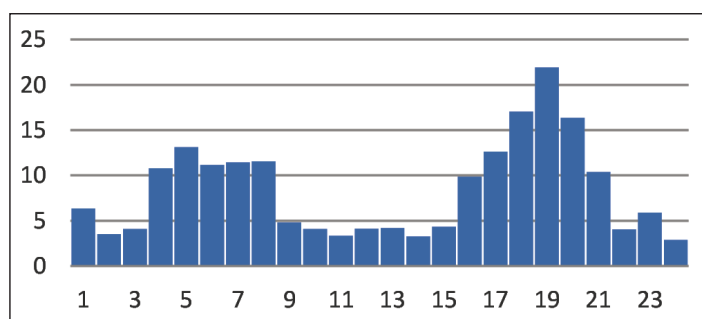


Рис. 11. Динамика часовой потребности в оборудовании

Среднее значение потребности в оборудовании (рис. 12) в этом случае по-прежнему составляет значение чуть более восьми единиц, однако плотность распределения этой случайной величины значительно отличается от показанной на рис. 6.

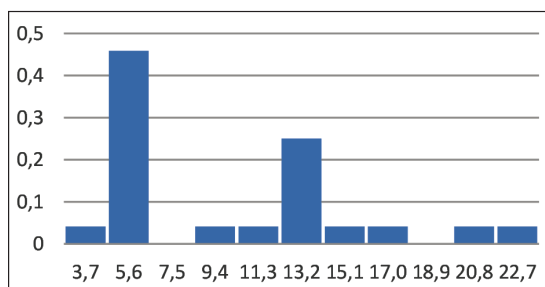


Рис. 12. Плотность распределения потребности в оборудовании по суточному сценарию

Различия настолько существенны, что использование вышеописанной методики становится весьма проблематичным. Очевидно, что критерии выбора численности оборудования в этом случае должны быть совершенно иные.

Имитационное моделирование. Имитационное моделирование в этом контексте используется в узком смысле как способ, позволяющий отличить этот подход от описанных ранее методов. Все они позволяли оценить исключительно меняющуюся во времени потребность в выполнении операций, никак не учитывая возможность их выполнения. Эта возможность определяется именно тем расчетным значением, которое призваны найти описанные процедуры.

В имитационном моделировании расчетное значение определяется как величина, позволяющая обеспечить приемлемое качество обработки поступающих заданий. В свою очередь, это качество обслуживания поступающих ежечасно заявок на выполнение операций характеризуется отношением между их немедленной обработкой и перенесением невыполненной части задания на следующий час, т. е. образованием очереди на выполнение операций.

Требования к оборудованию обладают высокой вариативностью, определяемой вероятностными характеристиками грузопотоков и параметрами их обработки, в то время как возможность предоставления оборудования по своей природе является если не постоянной, то, во всяком случае, гораздо более медленно меняющейся величиной.

Ранее отмечалось, что оборудование, количество которого соответствует средним значениям требований, в течение достаточно продолжительного интервала времени будет способно справиться с расчетным объемом операций, но за счет образования очередей. Чрезмерный объем выделенных для обработки грузопотока ресурсов будет способствовать устранению очередей, но вызывать потери, связанные с их недоиспользованием. Для определения оптимального соотношения потерь, связанных с образованием очередей, и потерь, связанных с простоем ресурсов, необходимо иметь средства для оценки размеров очередей.

Механизм образования очередей при динамически изменяющемся спросе на выполнение операций и фиксированном уровне ресурса на их выполнение показан на рис. 13.

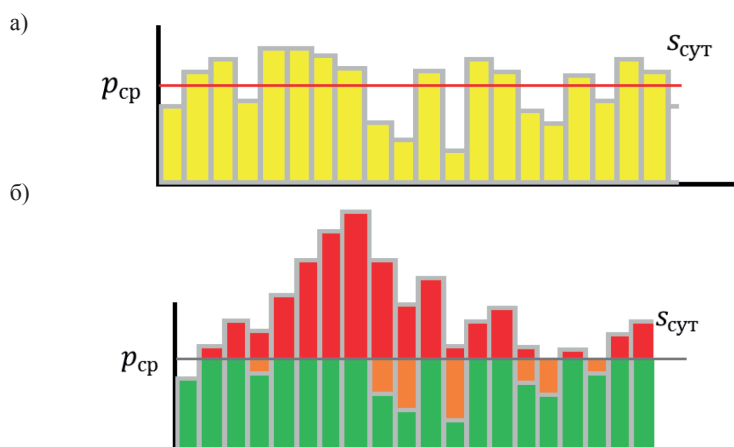


Рис. 13. Механизм образования очередей: а — динамически изменяющийся спрос на операции
б — формирование очередей вследствие дефицита ресурса их выполнения

В отдельные интервалы времени требования к интенсивности выполнения операций превышают возможности их выполнения, предоставляемые имеющимся оборудованием. Вследствие этого часть заявок на операции остается невыполненной и переносится на следующий интервал (возникает очередь). Если и в следующий момент не удастся справиться с текущим заданием и остатком от предыдущего, то очередь сохраняется; в противном случае она начинает сокращаться. В этом отношении моделируемая система выполнения операций перестает быть комбинаторной, в которой значения выходных параметров определяются только входными параметрами. Выходные параметры системы теперь начинают зависеть от ее состояния в данный момент времени, а состояние в следующий момент — от текущего состояния и входных величин. В кибернетике такие системы называются «автоматами с памятью». В первом приближении именно это свойство является границей, отделяющей аналитический, статистический и вариативный подходы от собственно имитационного моделирования в его современном понимании. Здесь моделируется не вариативность спроса на выполнение операций, а реакция системы с ограниченными ресурсами на вариативный спрос. Качество выполнения операций оценивается по параметрам образующейся очереди и это оцениваемое качество служит критерием выбора численности оборудования.

Основная идея моделирования очереди при дефиците оборудования проста: если имеющийся плановый объем операций на этот час плюс остаток от предыдущего часа меньше производительности распределенного для выполнения операций оборудования, то очереди в течение следующего часа не образуется, если же плановый объем плюс остаток больше производительности имеющегося оборудования, то очередь увеличивается на величину разности между этой суммой и производительностью имеющегося оборудования. Действие этого механизма иллюстрирует рис. 14, а, на котором показана динамика изменения длин очередей для рассматриваемого примера при разном количестве выделенного для выполнения операций оборудования на протяжении суток.

Моделирование на более продолжительном интервале подтверждает тот известный факт, что для обслуживания грузопотока в данном примере необходимо более восьми единиц оборудования — меньшее количество приводит к неограниченному возрастанию длины очереди (рис. 14, б).

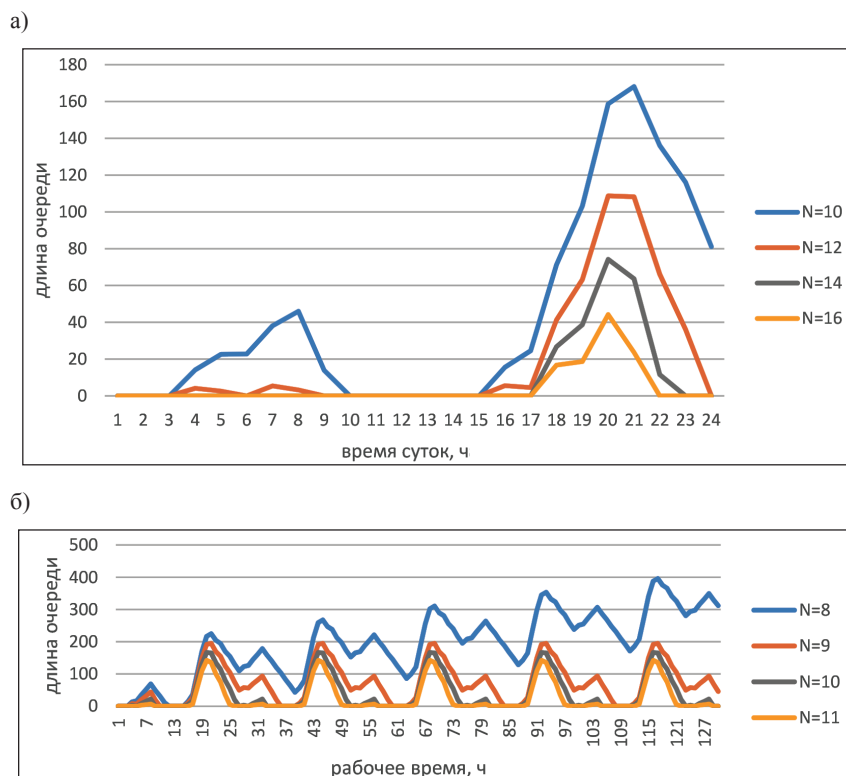


Рис. 14. Динамика образования очередей по времени при различной численности оборудования:
а — на протяжении суток; б — на продолжительном интервале

С ростом числа используемого оборудования очередь уменьшается, однако полное ее исчезновение достигается лишь тогда, когда оборудование способно справляться с максимальными всплесками требуемой интенсивности операций (формируемыми как плановое поступление плюс накопившаяся очередь). На рис. 15 приведены результаты моделирования, позволяющие определить момент исчезновения очередей (он наступает при количестве оборудования, превышающем 20 единиц, т. е. в 2,5 раза больше среднего).

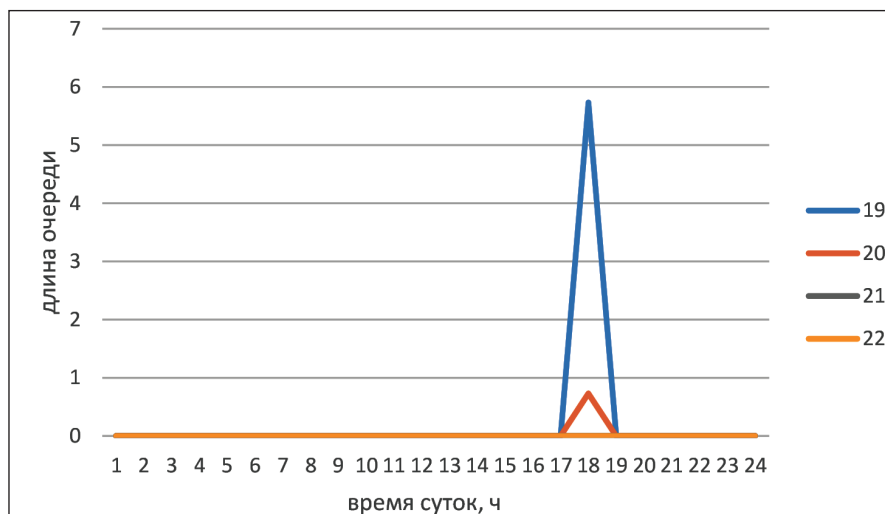


Рис. 15. Нахождение численности оборудования, устраняющего очереди

В статье описаны четыре различных модели: расчетно-аналитическая, модель статистических испытаний (Монте-Карло), статистическая модель генерации сценариев, имитационная модель. Каждая из них является определенным методическим развитием предыдущей и предназначена для получения некоторых дополнительных сведений, которые неспособна предоставить предшествующая модель. В то же время полученные с использованием предыдущих моделей данные носят менее специфический, а значит, более общий характер, что предполагает непротиворечивость и совместимость получаемых результатов «снизу – вверх».

Если в модели статистических испытаний принять все разбросы равными нулю, т. е. привести случайные величины к детерминированным средним значениям, результаты должны полностью совпадать с результатами расчетно-аналитической модели.

Если в методе «генерации сценариев» предположить равномерную вероятность распределения интенсивности операций по интервалам, то полученные результаты должны быть тождественны полученным с помощью модели Монте-Карло, а при дополнительном устранении разбросов параметров — результатам аналитических расчетов.

Если имитационную модель с анализом возникающих очередей привести к условиям работы предыдущих моделей, то она должна давать полностью совпадающие с ними результаты.

Таким образом, внутренняя структура все более сложных по строению и более богатых по спектру оцениваемых параметров должна последовательно повторять структуру предшествующих этапов развития моделей. В биологии такой принцип онтогенеза известен давно и имеет название *рекапитуляции*. Этот важный закон эволюции вполне заслуживает заимствования и продуктивного использования для доказательства адекватности комплексных имитационных моделей. В такой постановке принцип рекапитуляции требует, чтобы в этих моделях были предусмотрены средства приведения более сложных систем к любым более простым, проверенным или проверяемым. Это приведение должно выполняться путем изменения внутренних параметров, не меняющих саму структуру более сложной модели. В таком случае обеспечивается не только адекватность, но и робастность создаваемой модели на каждом этапе ее развития. Иными словами, в идеальном случае созданная модель должна потенциально обладать свойствами

всех предшествующих более простых моделей, а не представлять собой разрозненный набор их отдельных реализаций.

В приведенном примере сведение модели статистических испытаний сводится к заданию нулевых среднеквадратических отклонений. Как видно из рис. 16, получаемые в этом случае результаты совпадают с аналитическим расчетом.



Рис. 16. Статистические испытания без разброса

К аналогичным результатам приводит использование вероятностного сценария, в котором все интервалы имеют одинаковую среднюю интенсивность, заданную любым однородным символом (табл. 4).

Таблица 4

Равномерная кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s

Полученное в результате моделирования такого сценария распределение потребностей в оборудовании (рис. 17) совпадает с результатами моделирования Монте-Карло (см. рис. 8). Если при этом исключить разброс, то получаемый график будет полностью совпадать с представленным на рис. 16.

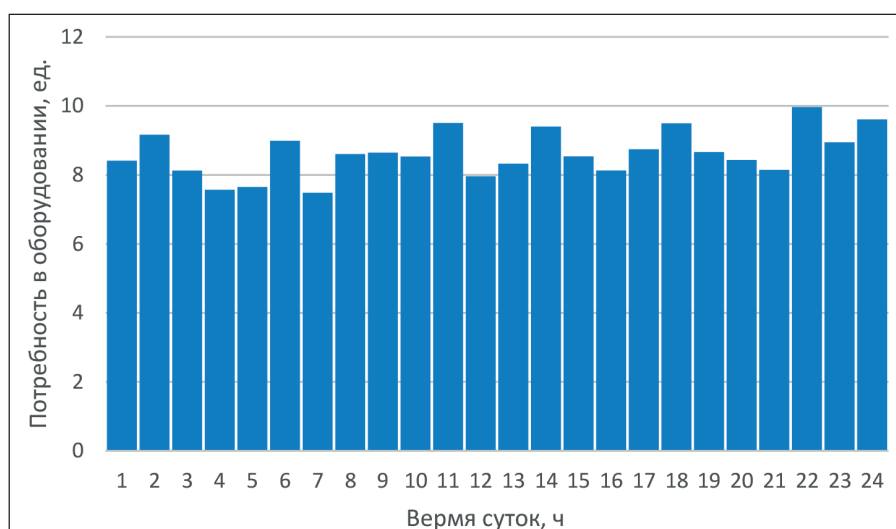


Рис. 17. Потребность в оборудовании при сценарии равномерного распределения

Имитационная модель должна показывать результаты, идентичные рассмотренным ранее. Например, анализ работы модели при равномерном распределении показывает неограниченный рост очереди при количестве оборудования, меньшем установленного значения 8,3 (рис. 18).

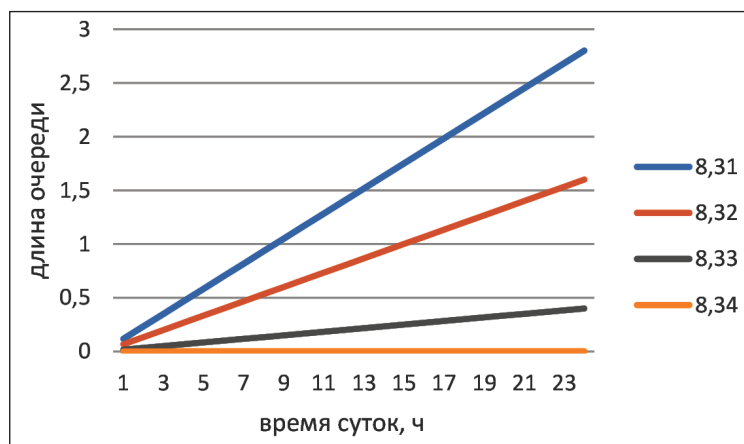


Рис. 18. Рост очереди при различном количестве оборудования

Обсуждение (Discussion)

В данной работе основные принципы имитационного моделирования и доказательства адекватности получаемых моделей были рассмотрены на примере одной операции. На практике такие технологические ресурсы, как оборудование, обычно используются для выполнения одновременно нескольких операций. В каждый отдельный момент времени динамика спроса на эти операции может превышать суммарное предложение этого ресурса, даже при его объеме выше средних операционных значений. В данном случае возникает задача рационального распределения имеющего ресурса между различными операциями. Распределенный таким образом технологический ресурс вызывает к жизни несколько иной механизм появления очередей, процесс образования которых должен моделироваться соответствующим образом.

Кроме того, выполняемые операции чаще всего выполняются с помощью оборудования, образующего связанные технологические линии. Распределение оборудования по отдельным звеньям также вызывает изменения в поведении моделируемой системы. При более детальном рассмотрении различного оборудования могут моделироваться взаимные помехи при работе оборудования в случае зависимости от изменяющихся внешних условий и действия непреодолимых сил. Все это составляет следующий уровень моделирования, который основывается на описанном в данной работе методологическом фундаменте и развивает полученную надстройку за счет более выразительных средств привлечением большего объема действующих факторов и оцениваемых параметров, развитых средств визуализации и регистрации.

Моделирование подобного детального уровня само по себе обычно не имеет смысла, поскольку целью является уточнение возможности поддержания интенсивности выполнения операций в конкретных объемах, определяемых моделированием более общего предыдущего уровня. В этом смысле детальное моделирование в основном касается уточнения уровня операционной производительности и использованного при этом «целеполагания». Условно эта фаза общей процедуры моделирования может быть названа *симуляционным моделированием* с целью отличия его от описанных в работе базовых моделей.

Выводы (Summary)

1. Моделирование является обязательным атрибутом современного подхода к проектированию, созданию и эксплуатации сложных технических объектов.
2. Методы моделирования, в зависимости от выбранного признака, могут быть разделены на разные классы, которые не противоречат, а дополняют друг друга.
3. Оптимальным инструментом для практики служат такие процедуры моделирования, которые используют модели разных классов, последовательно развивающих и уточняющих представления о моделируемом объекте.

4. В моделировании операций рациональной последовательностью является использование расчетно-аналитических моделей, моделей статистических испытаний, модели генерации вероятностных сценариев, а также имитационных моделей.

5. Указанная последовательность моделей не только позволяет поддерживать целостность и непротиворечивость данных в ходе проектирования объекта, но и доказывать адекватность используемых моделей, которые без этого утрачивают свое значение.

6. Наиболее детальное симуляционное моделирование, проводимое на уровне физических характеристик используемого оборудования, является важной и наиболее трудоемкой частью единой процедуры, и ее обособленное выполнение не имеет смысла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li S. Planning inland vessel operations in large seaports using a two-phase approach / S. Li, R.R. Negenborn, G. Lodewijks // *Computers & Industrial Engineering*. — 2017. — Vol. 106. — Pp. 41–57. DOI: 10.1016/j.cie.2017.01.027.

2. Moeller D. P. F. From Motorways on the Sea to Motorways of the River: A Simulation-Based Decision Making Approach for Developing Dry Ports / D. P. F. Möller // *Proceedings of the 2012 grand challenges in modeling & simulation (GCMS '12)*. — 2012. — Vol. 44. — Is. 11. — Pp. 171–176.

3. Taner M. E. Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals / M. E. Taner, O. Kulak, M. U. Koyuncuoğlu // *Computers & Industrial Engineering*. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.

4. Da Silva D. M. Analysis of river/sea transportation of ore bulk using simulation process / D. M. da Silva, M. Ventura // *Maritime Technology and Engineering*. — CRC Press, 2015. — Vol. 1. — Pp. 109–118.

5. Sun Z. MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals / Z. Sun, L. H. Lee, E. P. Chew, K. C. Tan // *Advanced Engineering Informatics*. — 2012. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.

6. Bin L. Study on modeling of container terminal logistics system using agent-based computing and knowledge discovery / L. Bin, L. Wen-Feng, Z. Yu // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. — 2009. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 36–36. DOI: 10.1080/15501320802524029.

7. Kuznetsov A. L. Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment / A.L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2016. — Vol. 10. — Nr. 3. — Pp. 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

8. Kuznetsov A. L. Simulation for assessment of bulk cargo berths number / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. E. Slitsan // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 87. — Pp. 062010. DOI:10.1088/1755-1315/87/6/062010.

9. Marinacci C. Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models / C. Marinacci, A. Quattrini, S. Ricci // *11th International Workshop On Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modeling & Simulation (HMS 2008)*. — 2008. — Pp. 190–201.

10. Maruri L. A Simulation of a container transport system between port and inland terminal depots / L. Maruri, L. Nuñez, A. Vidarte, J. M. Ezquerro // *1st International Industrial Simulation Conference*. — 2003. — Pp. 238–242.

11. Ottjes J. A. Simulation of a new port-ship interface concept for inter modal transport / J. A. Ottjes, H. P. M. Veeke // *Proc. of the 11th European Simulation Symposium*. — 1999. — Pp. 227–231.

12. Кузнецов А. Л. Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.

REFERENCES

1. Li, Shijie, Rudy R. Negenborn, and Gabriel Lodewijks. “Planning inland vessel operations in large seaports using a two-phase approach.” *Computers & Industrial Engineering* 106 (2017): 41–57. DOI: 10.1016/j.cie.2017.01.027.

2. Moeller, Dietmar P. F. "From Motorways on the Sea to Motorways of the River: A Simulation-Based Decision Making Approach for Developing Dry Ports." *Proceedings of the 2012 grand challenges in modeling & simulation (GCMS '12)*. 2012. Vol. 44. Is. 11. Pp. 171–176.
3. Taner, Mustafa Egemen, Osman Kulak, and Mehmet Ulaş Koyuncuoğlu. "Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals." *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014): 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.
4. Da Silva, D. Merino, and M. Ventura. "Analysis of river/sea transportation of ore bulk using simulation process." *Maritime Technology and Engineering*. Vol. 1. CRC Press, 2015. 109–118.
5. Sun, Z., L. H. Lee, E. P. Chew, and K. C. Tan. "MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals." *Advanced Engineering Informatics* 26.1 (2012): 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.
6. Bin, Li, Li Wen-Feng, and Zhang Yu. "Study on modeling of container terminal logistics system using agent-based computing and knowledge discovery." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 5.1 (2009): 36–36. DOI: 10.1080/15501320802524029.
7. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.3 (2016): 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.
8. Kuznetsov, A. L., A.V. Kirichenko, and A. E. Slitsan. "Simulation for assessment of bulk cargo berths number." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87. No. 6. IOP Publishing, 2017. DOI:10.1088/1755-1315/87/6/062010.
9. Marinacci, Cristiano, Andrea Quattrini, and Stefano Ricci. "Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models." *11th International Workshop On Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modeling & Simulation (HMS 2008)*. 2008. 190–201.
10. Maruri, Leire, Laura Nuñez, Ana Vidarte, and José Manuel Ezquerro. "Simulation of a Container Transport System Between Port and Inland Terminal Depots." *1st International Industrial Simulation Conference*. 2003. 238–242.
11. Ottjes, J.A., and H.P.M. Veeke. "Simulation of a new port-ship interface concept for inter modal transport." *Proc. of the 11th European Simulation Symposium*. 1999. 227–231.
12. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна —
кандидат технических наук,
генеральный директор
ООО «Логистический Парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1, Торгово-
логистическая зона «Янино-1», №1
e-mail: victorysch@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Kirichenko, Aleksandr V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: KirichenkoAV@gumrf.ru

Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N. —
PhD,
Chief Executive Officer
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District, Yanino-1 village, Trade
and logistics zone Yanino-1, No. 1, Leningrad Region,
Russian Federation
e-mail: victorysch@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.