

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.51:004.94
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149



АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ ДЕТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТОКА ЕГО ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОДЕЛЮ

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для современного этапа развития производственных систем актуальна задача предсказания их поведения в изменяющихся условиях. Это возможно за счет создания имитационной модели производственной системы, включающей сеть производственных потоков. На этапе разработки модели необходимо определить уровень детальности описания структуры производственного потока, позволяющий достичь цели моделирования при сохранении точности модели. **Цель работы и методы исследования.** Поставлена задача определения возможности использования упрощенной модели процесса при моделировании производственных систем – сети производственных процессов (потоков). С этой целью были разработаны две отличные по структуре имитационные модели одного и того же производственного потока. Базовая (детальная) модель полностью повторяет структуру потока; эквивалентная модель по структуре более проста, но ее характеристики и поведение с определенной степенью точности соответствуют детальной модели. На основе серии испытаний этих имитационных моделей анализируется возможность замены детальной модели производственного потока его эквивалентной моделью. Испытания моделей проводятся в условиях отсутствия вариабельности в работе оборудования рабочих станций (наилучший случай) и в условиях ее наличия (практический случай). **Результаты.** Результаты испытаний для случаев наличия и отсутствия вариабельности в работе оборудования хорошо согласуются как между собой, так и с теоретическим поведением производственного потока. **Практическая значимость.** Эквивалентная имитационная модель производственного потока позволяет упростить модель сети производственных потоков, а значит, и сократить затраты на ее разработку и испытания. При этом сохраняется достаточная точность получаемых результатов (характеристик производственного потока), следовательно, применение эквивалентных моделей производственных потоков целесообразно при моделировании их поведения.

Ключевые слова: производственный поток, имитационная модель, характеристики производственного потока, производительность, время цикла, объем незавершенного производства

© Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И., 2026

Для цитирования

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И. Анализ возможности замены детальной модели производственного потока его эквивалентной моделью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 143-149. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149>



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

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF REPLACING A DETAILED PRODUCTION FLOW MODEL WITH ITS EQUIVALENT MODEL

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). At the current stage of development of production systems, predicting their behavior under changing conditions is an important task. This can be achieved by developing a simulation model of a production system incorporating a network of production flows. At the model development stage, it is necessary to determine the level of detail required to describe the structure of a production flow that makes it possible to achieve the modeling objective while maintaining model accuracy. **Objectives and Methods Applied.** The study addresses the feasibility of using a simplified process model for simulating production systems, specifically, a network of production processes (flows). For this purpose, two simulation models with different structures have been developed for the same production flow. The base (detailed) model fully reproduces the structure of the flow, whereas the equivalent model has a simpler structure, while its characteristics and behavior correspond to those of the detailed model with a certain degree of accuracy. Based on a series of tests of these simulation models, the feasibility of replacing the detailed production flow model with its equivalent model has been analyzed. The models have been tested under conditions of no variability in the operation of workstation equipment (the best-case scenario) and under conditions where such variability is present (the practical scenario). **Results.** The test results for both the cases with and without variability in equipment operation are in good agreement with each other and with the theoretical behavior of the production flow. **Practical Relevance.** An equivalent simulation model of a production flow makes it possible to simplify the model of a production-flow network and, consequently, reduce the costs associated with its development and testing. At the same time, sufficient accuracy of the obtained results (production flow characteristics) is maintained. Therefore, the use of equivalent models of production flows is considered appropriate for simulating their behavior.

Keywords: production flow, simulation model, production flow characteristics, throughput, cycle time, work-in-process

For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Analysis of the Feasibility of Replacing a Detailed Production Flow Model with its Equivalent Model. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 143-149. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149>

Введение

Имитационное моделирование играет значительную роль в изучении современных производственных систем [1]. Объясняется это тем, что производственные системы относятся к классу организационно-технических, отличаются комплексным поведением ввиду многообразия связей между своими элементами, поэтому их имитационные модели позволяют оценивать показатели производственной системы и облегчают процессы принятия решений. Однако создание имитационной модели сопряжено с определенными проблемами [2], в частности, на этапе разработки возникает проблема детальности описания структуры производственного потока. При детальном описании структуры производственного потока модель сети производственных потоков оказывается громоздкой, что затрудняет работу с такой моделью. В этой связи важным становится вопрос оценки возможности использования эквивалентной имитационной модели производственного потока. Будем понимать под ней такую модель, у которой основные характеристики и поведение с определенной степенью точности соответствует характеристикам и поведению детальной имитационной модели производственного потока. Основное назначение эквивалент-

ной модели – упростить имитационную модель производственного потока, что позволит моделировать поведение сложных производственных систем. Возможность построения эквивалентной модели производственного потока основана на теории подобия [3].

Метод исследования

Согласно W. Норр и M.L. Spearman [4], производственный поток – это поток объектов через последовательность рабочих станций. Параметрами производственного потока является число рабочих станций и их пропускная способность, то есть количество объектов, которые могут быть обработаны на каждой рабочей станции. К основным характеристикам производственного потока относятся производительность TH , время цикла CT и объем незавершенного производства WIP . Теоретические характеристики производственного потока рассмотрены в работе [4] на примере модели, показанной на рис. 1.

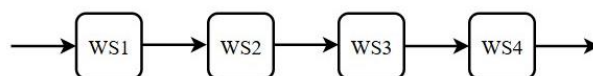


Рис. 1. Модель производственного потока

Fig. 1. A production flow model

Рассмотрены три случая работы производственного потока: наилучший, наихудший и практический. Наилучший случай соответствует сбалансированной линии, когда производительность всех рабочих станций одинакова, а действие случайных факторов отсутствует. Наихудший случай иллюстрирует обработку партий объектов либо вариант, при котором время обработки каждого из объектов является случайной величиной. Практический случай характеризуется случайной величиной пропускной способности оборудования. Практический случай является базой для проведения бенчмаркинга реальных производственных потоков и часто используется в работах по исследованию проблем производства [5].

Модель, показанная на **рис. 1**, является достаточно простой. Изучение реальных производственных систем ввиду сложности их поведения требует разработки имитационных моделей на основе принципов системной динамики [6, 7]. При разработке имитационной модели производственных потоков важным становится вопрос необходимого уровня детальности в описании структуры потока.

Введем понятия базовой (детальной) и эквивалентной имитационных моделей производственного потока. Базовая имитационная модель содержит все элементы моделируемого производственного потока. Эквивалентная имитационная модель содержит минимальный набор элементов, необходимый для моделирования производственного потока, и ее поведение и основные характеристики с определенной степенью точности соответствуют характеристикам и поведению базовой имитационной модели.

Для установления корректности использования при изучении производственных потоков их эквивалентных моделей необходимо сопоставить характеристики потока, полученные в результате испытаний базовой и эквивалентной моделей, между собой, а также с характеристиками, полученными на основе теоретических расчетов по методике [4]. Испытания целесообразно проводить для двух возможных случаев:

1. Отсутствие вариабельности в работе оборудования рабочих станций, то есть наилучший случай. Расчетные формулы для определения теоретических характеристик производственного потока [4] имеют вид

$$CT_{best} = \begin{cases} T_o, & \text{если } WIP \leq WIP_0 \\ \frac{WIP}{r_b}, & \text{если } WIP > WIP_0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$TH_{best} = \begin{cases} \frac{WIP}{T_o}, & \text{если } WIP \leq WIP_0 \\ r_b, & \text{если } WIP > WIP_0 \end{cases}. \quad (2)$$

где CT_{best} , TH_{best} – время цикла и пропускная способность процесса для наилучшего случая; T_o – чистое операционное время; r_b – пропускная способ-

ность оборудования, являющегося ресурсом, лимитирующим производительность потока; WIP_0 – критический уровень НЗП.

2. Наличие вариабельности в работе оборудования рабочих станций, то есть практический случай. Расчетные формулы для определения теоретических характеристик производственного потока имеют вид [4]

$$CT_{PWC} = T_o + \frac{WIP - 1}{r_b}, \quad (3)$$

$$TH_{PWC} = \frac{WIP \cdot r_b}{WIP_0 + WIP - 1}. \quad (4)$$

где CT_{PWC} , TH_{PWC} – время цикла и пропускная способность процесса для практического случая.

Таким образом, теоретические характеристики производственного потока представляют собой функции параметров производственного потока – чистого операционного времени процесса T_o , пропускной способности лимитирующего ресурса r_b и независимой переменной объема незавершенного производства WIP . То есть результаты испытаний имитационных моделей производственного потока будут представлены в виде графиков изменения параметров моделей при определенном значении интенсивности входного потока объектов r_a . Для построения характеристик имитационных моделей необходимо провести серию испытаний при различных значениях интенсивности входного потока r_a . Интенсивность входного потока должна изменяться в диапазоне от 0 до r_b , так как при больших значениях интенсивности входного потока объем незавершенного производства WIP будет неограниченно возрастать.

Теоретическая модель производственного потока. Определим теоретические характеристики модели производственного потока, представленной на **рис. 1**. Модель включает четыре рабочих станции с одинаковыми параметрами, каждая рабочая станция выполняет работу за 2 ч (время обработки $t_e = 2$ ч) и сразу (без задержки) передает работу на следующую рабочую станцию. Так как время обработки на всех станциях одинаковое, то все станции имеют одинаковую пропускную способность

$$r = \frac{1}{t_e} = 0,5 \text{ ед/ч}.$$

Чистое операционное время производственного потока равно сумме времени обработки на всех рабочих станциях и для рассматриваемого примера составит $T_o = 8$ ч.

Критический уровень НЗП WIP_0 определяется пропускной способностью лимитирующего ресурса

r_b и чистым операционным временем T_o . Поскольку пропускная способность всех рабочих станций одинакова, то $r_b = r = 0,5$ и

$$WIP_0 = r_b T_o = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ шт.}$$

Базовая имитационная модель производственного потока. Эффективным инструментом моделирования производственных потоков является модель потоков и запасов [8, 9]. В модели потоков и запасов используются следующие элементы:

1. Поток моделирует перемещение совокупности объектов и характеризуется количеством объектов в единицу времени.

2. Резервуар моделирует место хранения объектов и характеризуется количеством объектов.

3. Конвейер моделирует обработку объектов на каком-либо оборудовании, характеризуется временем обработки объектов и количеством обрабатываемых объектов.

4. Коннектор – элемент, используемый для вычисления параметров модели.

Таким образом, при моделировании производственного потока, состоящего из четырех рабочих станций, для каждой производственной ячейки используется совокупность следующих элементов:

Резервуар S – Входной поток R – Конвейер M – Выходной поток T.

Вид базовой имитационной модели, выполненной в программе моделирования iThink, показан на рис. 2.

Базовая модель производственного потока включает следующие элементы:

- входной поток объектов r_a , поступающих на обработку (ед./ед. времени);
- запасы объектов перед рабочими станциями S1, S2, S3, S4 (ед.);
- рабочие станции (станки) M1, M2, M3, M4, характеризующиеся количеством обрабатываемых объектов (ед.);
- входные $r1, r2, r3, r4$ и выходные $t_{e1}, t_{e2}, t_{e3}, t_{e4}$ потоки объектов рабочих станций, которые характеризуются пропускной способностью (ед./ед. времени). Начальные значения $t_{e1} - t_{e4}$ содержат время обработки объектов;

– расчетные величины: объем незавершенного производства WIP, производительность потока TH и время цикла CT.

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей по четыре ($i=1 \div 4$) разностных уравнения для запасов и станков:

$$\begin{aligned} S_{i,t} &= S_{i,t-dt} + (t_{ei-1} - r_i) dt, \\ M_{i,t} &= M_{i,t-dt} + (r_i - t_{ei}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Приняты следующие начальные значения параметров модели:

$$S1 = S2 = S3 = S4 = 0; \quad M1 = M2 = M3 = M4 = 1;$$

$$r1 = r2 = r3 = r4 = 0,5; \quad t_{e1} = t_{e2} = t_{e3} = t_{e4} = 2.$$

В ходе вычислений определяются следующие переменные:

1. TH – производительность потока, определяется встроенной функцией программы iThink THROUGHPUT(T4).

2. CT – время цикла, определяется встроенной функцией программы iThink CYCLETIME(T4).

3. WIP – объем незавершенного производства, определяется суммарным количеством объектов, находящихся в процессе обработки на рабочих станциях, и объектов, находящихся внутри процесса в ожидании обработки.

$$WIP = \sum_{i=1}^4 S_i + \sum_{i=1}^4 M_i. \quad (6)$$

Эквивалентная имитационная модель производственного потока. В отличие от базовой модели производственного потока, содержащей четыре рабочие станции, эквивалентная модель этого потока содержит только один рабочий центр, характеристики которого определяются из условия соответствия параметрам базовой модели. Основными условиями являются:

- равенство чистого времени обработки T_o базовой и эквивалентной моделей;
- равенство пропускных способностей лимитирующих ресурсов r_b базовой и эквивалентной моделей.

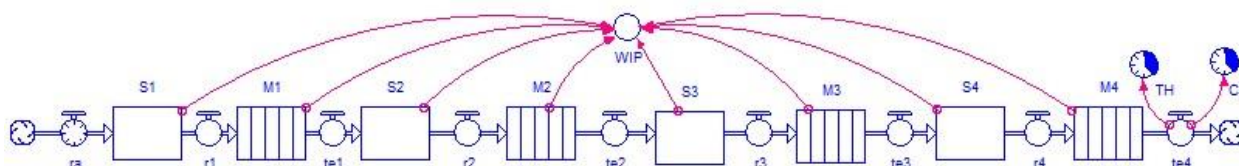


Рис. 2. Базовая модель производственного потока

Fig. 2. A basic model of a production flow

Эквивалентная модель производственного потока, разработанная в iThink, представлена на **рис. 3**. Эквивалентная модель содержит один резервуар и один конвейер, между которыми установлен поток r_b , определяющий пропускную способность лимитирующего ресурса. Время обработки объектов конвейером равно чистому операционному времени базового потока. Резервуар служит для временного хранения объектов перед обработкой на станке.

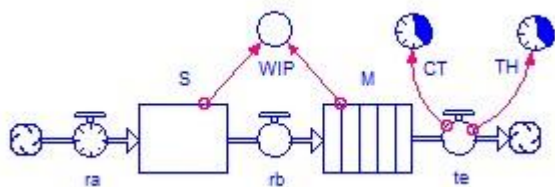


Рис. 3. Эквивалентная модель производственного потока

Fig. 3. An equivalent model of a production flow

Модель эквивалентного производственного потока (см. **рис. 3**) имеет следующие объекты:

- входной поток объектов r_a , поступающих на обработку (ед./ед. времени);
- запас объектов перед рабочей станцией S (ед.);
- рабочая станция (станок) M , характеризующаяся количеством обрабатываемых объектов (ед.);
- входной r_b и выходной t_e потоки объектов рабочих станций, характеризующиеся пропускной способностью (ед./ед. времени) и временем обработки;
- расчетные величины: объем незавершенного производства WIP , производительность потока TH и время цикла CT .

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей одно разностное уравнение для запаса и одно разностное уравнение для станка:

$$\begin{aligned} S_t &= S_{t-dt} + (r_a - r_b) dt; \\ M_t &= M_{t-dt} + (r_b - t_e) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Приняты следующие начальные значения параметров модели:

$$S = 0; M = 4; r_b = 0,5; t_e = 8,$$

где t_e – суммарное время обработки на четырех рабочих станциях базовой модели производственного потока.

В ходе вычислений определяются следующие переменные:

1. TH – производительность потока, определяется встроенной функцией программы iThink – THROUGHPUT(T).

2. CT – время цикла, определяется встроенной функцией программы iThink – CYCLETIME(T).

3. WIP – объем незавершенного производства, вычисляется по формуле $WIP = S + M$.

Полученные результаты и их обсуждение

1. Случай отсутствия вариабельности в работе оборудования рабочих станций (наилучший случай).

Результаты испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей производственного потока в сравнении с теоретическими данными для наилучшего случая представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Данные испытаний базовой и эквивалентной моделей для наилучшего случая
Table 1. Test data of the basic and equivalent models for the best-case scenario

Ra	Теоретическая модель			Базовая модель			Эквивалентная модель		
	TH	CT	WIP	TH	CT	WIP	TH	CT	WIP
0,125	0,125	8	1	0,125	8	1	0,125	8	1
0,250	0,250	8	2	0,250	8	2	0,250	8	2
0,375	0,375	8	3	0,375	8	3	0,375	8	3
0,50	0,50	8	4	0,50	8	4	0,50	8	4

Как видно из приведенных данных, поведение эквивалентной имитационной модели производственного потока совпадает с теоретическими характеристиками и поведением базовой имитационной модели производственного потока.

2. Наличие вариабельности в работе оборудования рабочих станций (практический случай).

При моделировании вариабельности оборудования принято использовать экспоненциальное распределение [4, 10] времени обработки объектов. В имитационной модели производственного потока работа оборудования определяется его пропускной способностью r . Учитывая, что пропускная способность

$$r = \frac{1}{t_e}, \quad (8)$$

где t_e – время обработки объекта на станке, можно записать выражение для функции экспоненциального распределения случайной величины пропускной способности:

$$r = \frac{1}{t_e} \cdot [-\ln(c)], \quad (9)$$

где c – случайное число в диапазоне от 0 до 1.

Для базовой и эквивалентной моделей пропускная способность оборудования одинакова и составляет 0,5 ед./ч, что соответствует времени обработки на отдельном станке в течение 2 ч. Тогда пропускная способность производственного потока будет равна

$$r = \frac{1}{2} \cdot [-\ln(c)]. \quad (10)$$

Основной проблемой испытаний имитационных моделей в условиях вариабельности является то, что при изменении интенсивности входного потока r_a от 0 до 1 значение объема незавершенного производства будет стремиться к WIP_0 или постоянно возрастать. Из этого следует, что при определенном значении r_a значение WIP будет относительно стабильным. Стабильность объема незавершенного производства при испытании имитационных моделей свидетельствует о том, что этот режим работы соответствует одной из точек на теоретической характеристике (формулы (3) и (4)) модели производства для практического случая.

Дополнительной проблемой при испытаниях имитационной модели производственного потока в условиях вариабельности пропускной способности оборудования является случайность поведения параметров модели – каждая новая реализация отличается от всех остальных. Случайный характер поведения характеристик модели требует статистических методов обработки результатов. При проведении испытаний имитационных моделей в условиях вариабельности использован метод обработки данных [10], суть которого заключается в осреднении нескольких реализаций (сценариев) работы имитационной модели. Осреднение характеристики WIP проводилось по десяти реализациям испытаний имитационных моделей.

Усредненная характеристика WIP остается случайной и поэтому необходимо определить среднее значение характеристики WIP как среднее по времени. Таким образом, итоговый результат поведения имитационной модели усредняется по сценариям и по времени.

В результате испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей получены следующие характеристики (табл. 2).

Таблица 2. Данные испытаний базовой и эквивалентной моделей для практического случая
Table 2. Test data of the basic and equivalent models for the practical scenario

Характеристика	Базовая модель	Эквивалентная модель
WIP	26,09	25,3
TH	0,38	0,42
CT	58,0	56,92

На рис. 4 и 5 представлены теоретические характеристики TH и CT модели производственного потока для практического случая [4] и результаты испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей.

Таким образом, обе имитационные модели дают результаты, которые согласуются друг с другом и достаточно хорошо согласуются с характеристиками теоретической модели для практического случая.

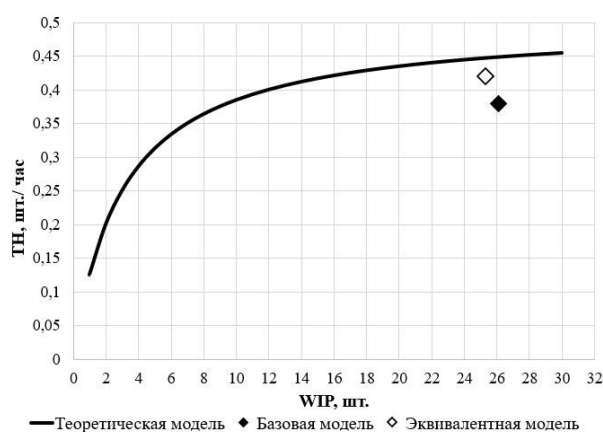


Рис. 4. Производительность производственного потока

Fig. 4. Production flow throughput

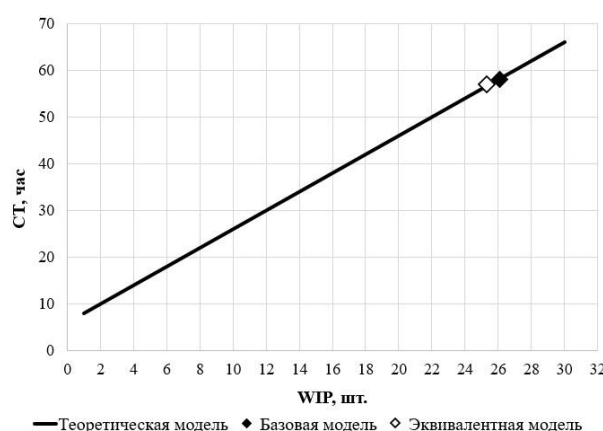


Рис. 5. Время цикла производственного потока

Fig. 5. Production flow cycle time

Заключение

1. Подтверждено, что при отсутствии вариабельности работы рабочих станций характеристики базовой и эквивалентной имитационных моделей точно соответствуют теоретическим характеристикам модели производственного потока.

2. При наличии вариабельности работы рабочих станций характеристики базовой и эквивалентной имитационных моделей достаточно хорошо согласуются с теоретическими характеристиками модели производственного потока.

3. Показано, что ввиду достаточной точности получаемых результатов эквивалентная модель производственного потока может быть использована в задачах моделирования производственных систем.

Список источников

1. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // International Journal of Production Research. 2020, vol. 58, no. 7, pp. 1927-1949. DOI: 10.1080/00207543.2019.1636321.

2. Fowler J.W., Rose O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems // SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. 2004, vol. 80, no. 9, pp. 469-476. doi:10.1177/0037549704044324.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: ЛКИ, 2018. 296 с.
4. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. Long Grove: Waveland Press, 2011. 720 p.
5. Pound E.S., Bell J.H., Spearman M.L. Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 384 p.
6. Forrester J.W. Industrial dynamics. Eastford: Martino Fine Books, 2013. 480 p.
7. Sterman J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000. 1008 p.
8. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004. 165 p.
9. Медоуз Д. Системное мышление. Как создавать и улучшать системы в бизнесе и жизни. М.: МИФ, 2025. 272 с.
10. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw Hill, 2024. 688 p.
1. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. In: International Journal of Production Research. 2020;58 (7):1927-1949. DOI: 10.1080/00207543.2019.1636321.
2. Fowler, J.W., Rose O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. 2004;80(9):469-476. doi:10.1177/0037549704044324.
3. Gukhman A.A. *Vvedenie v teoriyu podobiya* [Introduction to similarity theory]. Moscow: LKI, 2018, 296 p. (In Russ.)
4. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. Long Grove: Waveland Press, 2011, 720 p.
5. Pound E.S., Bell J.H., Spearman M.L. Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York: McGraw-Hill Education, 2014, 384 p.
6. Forrester J.W. Industrial dynamics. Eastford: Martino Fine Books, 2013, 480 p.
7. Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000, 1008 p.
8. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004, 165 p.
9. Medouz D. *Sistemnoe myshlenie. Kak sozdavat i uluchshat systemy v biznese i zhizni* [Systems thinking. How to create and improve systems in business and life]. Moscow: MIF, 2025, 272 p. (In Russ.)
10. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw Hill, 2024, 688 p.

References

Поступила 19.02.2026; принята к публикации 25.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 19/02/2026; revised 25/03/2026; published 30/09/2026

Запорожцев Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Хазова Вероника Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Хазова Виктория Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

Aleksandr V. Zaporozhtsev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Veronika I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Viktoriya I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635