

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Организация производственного процесса изготовления деталей может быть многовариантной. Используя параметры оптимизации — максимально возможное количество изготовления годных деталей и максимальная загрузка оборудования (т.е. получение максимальной прибыли), а также ограничения — процент брака, возможность повторной обработки деталей в системе имитационного моделирования Arena Rockwell Soft, были разработаны различные модели, позволившие выявить «узкие места» в организации производственного процесса. Рассмотрение моделей позволило оценить: загрузженность станков, выпуск годных деталей, среднюю продолжительность пребывания деталей в производственном процессе, среднее число деталей в очереди, прибыль и убытки при реализации производственного процесса. В результате моделирования показано, что наиболее оптимальной формой организации производственного процесса является двухпредметная поточная линия.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, производственная система, имитационная модель, изготовление деталей, организация производства.

**Введение.** Производственный процесс изготовления детали — это сложная система, состоящая из множества отдельных элементов и отношений, возникающих в процессе производства. Состояние процесса характеризуется такими параметрами, как время, стоимость, загрузка оборудования и др. На ход технологического процесса оказывают влияние разные производственные факторы, приводящие к изменению в ходе технологического процесса.

С развитием компьютерной техники и технологий имитационное моделирование стало самым используемым инструментом для моделирования.

Имитационное моделирование — это процесс моделирования поведения реальной системы, экспериментирования над моделью, с целью понять поведение этой системы в рамках некоторых ограничений [1]. Имитационное моделирование имеет ряд преимуществ:

- можно экспериментировать над различными управленческими, организационными проектами, не используя материальные ресурсы для их реализации;

- можно рассмотреть поведение моделируемой системы в определенном интервале времени (за день, год и т. д.), что позволит оценить перспективы развития системы;

- можно рассмотреть многовариантность производственных условий, определить «узкие места» («места снижения производительности», простой оборудования и др.) и ответить на вопрос «что если». Это позволит выявить, какие факторы являются определяющими в поведении моделируемой системы [2].

События реального мира сложны и неопределенны. Поэтому нужно строить модели, учитываю-

щие все многообразие мира (детерминированные и стохастические модели, дискретные и непрерывные модели, статические и динамические модели). Имитационное моделирование позволяет это выполнить.

В настоящее время имитационное моделирование используется в моделировании производственных процессов [3–5], транспортных перевозок [6, 7], складирования [8], в строительстве [9], экономике [10], работы технических систем [11] и т.д.

Моделирование производственного процесса изготовления деталей позволяет максимально возможно воспроизвести сложные производственные ситуации. Рассмотрение многовариантности производственных условий позволяет выявить «узкие места» и ответить на вопрос «что если».

Для производств, с быстро меняющимся ассортиментом продукции, выпуском продукции небольшими сериями актуальными являются следующие задачи: рационального использования оборудования, фонда рабочего времени, формы организации производственного процесса, временные оценки полного производственного цикла, величина заделов, вместимость складских помещений являются актуальными. В этих условиях ценность (актуальность) принятых решений возрастает с уменьшением затрат времени на принятие решения. Поэтому имитационное моделирование является эффективным инструментом для решения широкого круга производственных задач [12].

Целью данной работы является обоснованный выбор эффективной формы организации производственного процесса изготовления детали. Параметры оптимизации — максимально возможное количество изготовления годных деталей и максимальная

Характеристики производственного процесса

Номер операции	Время обработки детали на станке	
	Минимальное, мин	Максимальное, мин
OP1	12	14
OP2	5	6
OP3	3	5
OP4	4	5
OP5	6	8
OP6	9	12

Экономические параметры использования оборудования

Номер станка	Прибыль за обработку деталей, \$/час	Убытки из-за простоя, \$/час
Machine 1	50	20
Machine 2	30	10
Machine 3	25	8
Machine 4	35	12
Machine 5	40	7
Machine 6	30	10

загрузка оборудования, т.е. получение максимальной прибыли. В качестве ограничений — процент брака, возможность повторной обработки деталей.

**Постановка задачи.** Производственный процесс изготовления детали реализуется на металлообрабатывающих станках и состоит из шести операций. Детали подаются на обработку после оценки ее качества контролером с интервалом времени  $9,5 \pm 2,5$  мин. В производственном процессе осуществляется последовательное движение деталей по операциям. Передача с одной операции на другую осуществляется поштучно (в силу особенностей детали). В процессе обработки последовательность операций должна быть четко соблюдена. Замена операций местами не допускается. На каждой операции используется одна единица оборудования. Время обработки на операциях представлено в табл. 1.

После процесса обработки (выполнены все операции), деталь поступает к контролеру, который оценивает качество детали и дает заключение о соответствии детали требованиям.

В разрабатываемой модели оценим экономические параметры при реализации производственного процесса изготовления детали — убытки из-за простоя станков и прибыль за обработку деталей. В табл. 2 представлены параметры прибыли (убытков) в час для всех станков.

Прибыль по производственному процессу определяется как:

$$C = C_w - C_p, \quad (1)$$

где  $C_w$  — суммарная прибыль за обработку деталей на всех станках, определяется часовой ставкой и временем работы для каждого станка,  $C_p$  — суммарные убытки из-за простоя станков, определяются часовой ставкой и временем простоя для каждого станка. Определить загруженность станков для различных вариантов использования возможно с помощью имитационного моделирования.

Для достижения поставленной цели исследования выполним несколько этапов моделирования. (Имитационное моделирование производственного процесса осуществляется за одну смену (8 часов.))

1. Разработаем имитационную модель процесса «AS-IS». Модель позволит определить следующие параметры: количество деталей, обработанных каждым станком за 8 часов; загруженность станков;

убытки из-за простоя станков; прибыль за обработку деталей на станках; средняя продолжительность пребывания деталей в производственном процессе; среднее число деталей в очереди на обработку к конкретному станку; средняя продолжительность пребывания деталей в очереди на обработку.

(Указанные параметры будем оценивать на всех этапах.)

2. Изменим модель «AS-IS» с учетом ограничений — бракованные детали составляют 20 % и возможность повторной обработки бракованных деталей.

3. Определим «узкие места» для модели «AS-IS».

4. Разработаем имитационную модель «TO-BE», реализующую:

— возможность дополнительной загрузки неэффективно используемых станков;

или

— возможность установки дополнительных единиц оборудования на «узкие места».

5. Выберем оптимальную модель «TO-BE».

В настоящее время на рынке программных продуктов представлено достаточное количество средств имитационного моделирования. Самыми востребованными являются следующие системы: Arena Rockwell Soft, AnyLogic, Simio, Simul, Repast, NetLogo, FlexSim, Ponodel [13]. В данной работе для имитационного моделирования будет использоваться программный продукт Arena Rockwell Soft.

Arena Rockwell Soft отличается широкими функциональными возможностями, простотой использования, богатым набором статистических показателей, включает динамическую анимацию [14].

**Имитационное моделирование.** На рис. 1 представлена модель «AS-IS» (1-й этап моделирования). Модуль Create 1 («Create») используется для генерации поступления деталей («Деталь 1»). Модули OP1 — OP6 («Process») моделируют процесс обработки деталей на соответствующих операциях. Модуль Dispose 1 («Dispose») выводит обработанные детали из производственного процесса.

На рис. 2 представлена модель «AS-IS» с возможностью повторной обработки бракованных деталей. По условию, бракованные детали могут пройти только одну повторную обработку, если после неё брак не устранен, то деталь выводится из производственного процесса. Модуль Decide 1 («Decide») задает «2-way by Chance» — 80 % (бракованные детали составляют 20 %).

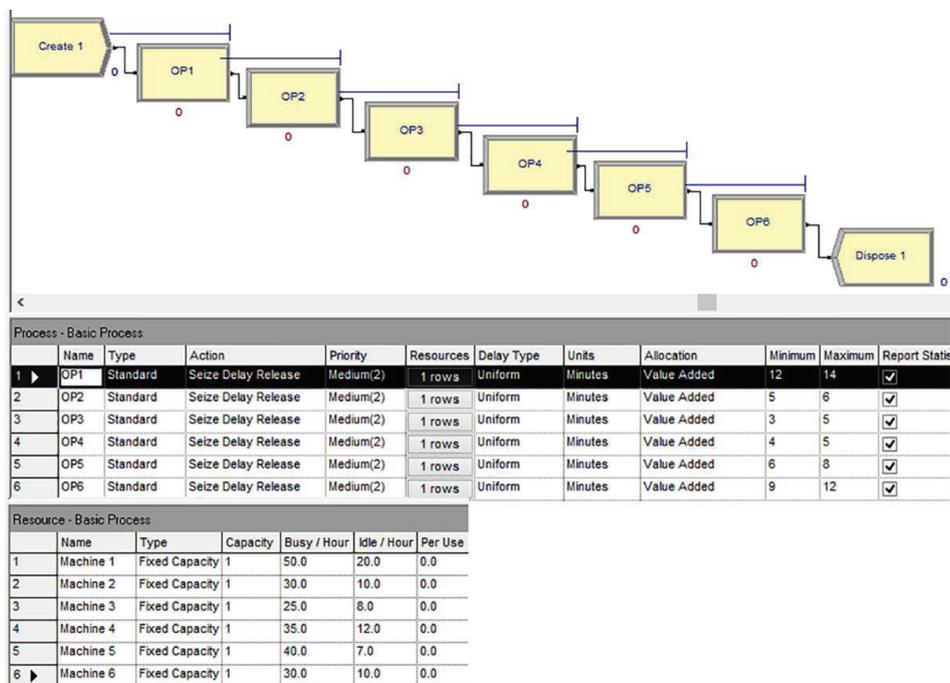


Рис. 1. Модель «AS-IS» (1-й этап моделирования)

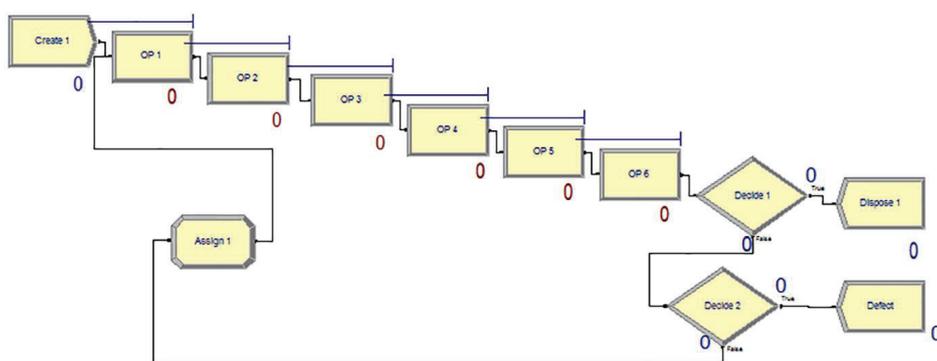


Рис. 2. Модель «AS-IS» с возможностью повторной обработки бракованных деталей (2-й этап моделирования)

Модуль Assign 1 («Assign») «помечает» бракованные детали, идущие на обработку, и присваивает им номер 1. Модуль Decide 2 («Decide») отслеживает циклы обработки бракованных деталей и выводит детали из производственного процесса.

На рис. 3 представлена модель «TO-BE». На операциях OP2–OP4 станки недогружены. Поэтому рассматривается вариант дополнительной загрузки оборудования обработкой другой детали («Деталь 2»). Время обработки «Деталь 2» на операциях OP2–OP4 соизмеримо с временем обработки «Деталь 1». Модуль Create 2 («Create») используется для генерации поступления «Деталь 2». Модуль Decide 3 («Decide») позволяет определить «Деталь 1» или «Деталь 2». «Деталь 1» продолжает последующую обработку на операциях OP5 и OP6, «Деталь 2» выводит из процесса обработки с использованием модуля Dispose 2 («Dispose»).

**Результаты и обсуждение.** Результаты имитационного моделирования при реализации модели, представленной на рис. 1 сформированы в отчет по результатам моделирования (панели «Resources», «Queues», «Entities») и представлены на рис. 4. Из отчета видна неравномерная загрузка станков от коэффициента загрузки 1,00 для Machin 1

(максимальная загрузка) до коэффициента загрузки 0,30 для Machin 3 (максимальная загрузка). За время 8 часов было полностью обработано 35 деталей, а в производственный процесс поступило 52 детали. Поэтому среднее время ожидания деталей в накопителе перед операцией OP1 составило 65,0447 минуты, а среднее число деталей в очереди составило 6,9500. Средняя продолжительность пребывания деталей в производственном процессе обработки составила 102,56 минут.

Для данной модели суммарная прибыль за обработку деталей на всех станках составила 995,81 \$, а убытки из-за простоя станков — 201,43 \$. Таким образом, прибыль по производственному процессу (согласно формуле 1) составила 794,38 \$.

Реализация модели, представленной на рис. 2, позволила сформировать отчет, представленный на рис. 5. Повторная обработка деталей с браком увеличила среднюю продолжительность пребывания деталей в производственном процессе до 117,17 минуты. Среднее время ожидания деталей в накопителе перед операцией OP1 увеличилось до 75,0937 минуты, а среднее число деталей в очереди возросло до 8,5314 минуты. На выходе данной модели — 28 годных деталей, 6 деталей прошли

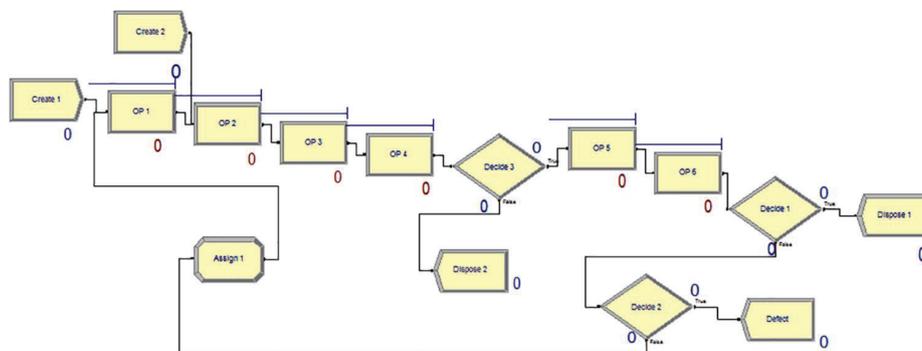


Рис. 3. Модель «ТО-ВЕ»

## Usage

	Inst Util	Num Busy	Num Sched	Num Seized
Machine 1	1,00	1,00	1,00	38,00
Machine 2	0,42	0,42	1,00	37,00
Machine 3	0,30	0,30	1,00	36,00
Machine 4	0,34	0,34	1,00	36,00
Machine 5	0,51	0,51	1,00	35,00
Machine 6	0,76	0,76	1,00	35,00

## Cost

	Busy Cost	Idle Cost
Machine 1	399.87	0.00
Machine 2	99.54	46.80
Machine 3	60.47	44.65
Machine 4	92.88	63.53
Machine 5	164.48	27.22
Machine 6	178.57	19.23

## Time

Waiting Time	Other			
	Average	Number Waiting	Average	
OP1.Queue	65.0447	OP1.Queue	6.9500	
OP2.Queue	0.00	OP2.Queue	0.00	
OP3.Queue	0.00	OP3.Queue	0.00	
OP4.Queue	0.00	OP4.Queue	0.00	
OP5.Queue	0.00	OP5.Queue	0.00	
OP6.Queue	0.04444914	OP6.Queue	0.00324108	
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Detail1	102.56	(Insufficient)	44.1918	163.95

Рис. 4. Отчет по модели «AS-IS» (1-й этап моделирования)

повторную обработку, одна деталь имеет неисправимый брак (результаты в отчетный рис. 5 не вошли). Прибыль по производственному процессу (согласно формуле 1) составила 802,43 \$.

Реализация моделирования, представленная на рис. 2 с установкой двух единиц оборудования на операции OP 1, позволила получить более равномерный коэффициент загрузки оборудования (рис. 6), увеличить количество обработанных деталей (33 годные детали, 9 деталей прошли повторную обработку, одна деталь имеет неисправимый брак — результаты в отчетный рис. 6 не вошли). Прибыль по производственному процессу (согласно формуле 1) составила 1356,31 \$.

Реализуемая модель по выходу готовых деталей является самой удачной. Однако, соизмерив объем дополнительных затрат на покупку нового оборудования и увеличения выпуска готовых деталей на восемь штук — очевидно, что данная модель является экономически нецелесообразной.

Наибольший интерес представляет модель, представленная на рис. 3. Изменяя параметры поступления в производственный процесс «Деталь 2», можно добиться максимальной загрузки оборудования и оптимизировать выход обработанных деталей «Деталь 1» и «Деталь 2». Наибольшее количество обработанных деталей («Деталь 1» — 28 штук, «Де-

## Usage

	Inst Util	Num Busy	Num Sched	Num Seized
Machine 1	1,00	1,00	1,00	38,00
Machine 2	0,42	0,42	1,00	37,00
Machine 3	0,31	0,31	1,00	36,00
Machine 4	0,34	0,34	1,00	36,00
Machine 5	0,51	0,51	1,00	36,00
Machine 6	0,79	0,79	1,00	35,00

## Cost

	Busy Cost	Idle Cost
Machine 1	397.67	0.00
Machine 2	98.76	46.62
Machine 3	62.43	44.02
Machine 4	94.17	63.71
Machine 5	164.00	27.23
Machine 6	184.16	17.18

## Time

Waiting Time	Other			
	Average	Number Waiting	Average	
OP1.Queue	75.0937	OP1.Queue	8.5314	
OP2.Queue	0.00	OP2.Queue	0.00	
OP3.Queue	0.00	OP3.Queue	0.00	
OP4.Queue	0.00	OP4.Queue	0.00	
OP5.Queue	0.00	OP5.Queue	0.00	
OP6.Queue	0.07936275	OP6.Queue	0.00578687	
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Detail1	117.17	(Insufficient)	50.1605	169.61

Рис. 5. Отчет по модели «AS-IS» с возможностью повторной обработки бракованных деталей (2-й этап моделирования)

таль 2» — 56 штук) достигается при поступлении «Деталь 2» один раз в 7 минут (закон распределения между поступлением деталей экспоненциальный).

Сформированный отчет по этой модели, представленный на рис. 7, позволяет оценить коэффициент загрузки от 1,00 для Machine 1 до 0,41 для Machine 5. В целом по модели коэффициент загрузки является более равномерным, чем для рассмотренных выше моделей. Наиболее перегруженными являются Machine 1 и Machine 2. Для них среднее время ожидания деталей обработки составляет 71,9111 и 26,0140 минуты, а среднее число деталей в очереди составило 8,6087 и 6,4255 соответственно. Средняя продолжительность пребывания деталей в производственном процессе обработки составила для «Детали 1» — 122,89 минуты, а для «Детали 2» — 40,6730 минуты. Прибыль по производственному процессу (согласно формуле 1) составила 1154,12 \$.

**Выводы.** Выполненные в работе дискретно-событийные имитационные модели производственного процесса изготовления деталей позволили выявить «узкие места» производственного процесса, а предложить способы их устранения.

В результате моделирования установлено, что оптимальной формой организации производственного процесса обработки является двухпредметная

Usage					
	Inst Util	Num Busy	Num Sched	Num Seized	Sched Util
Machine 1	0.81	1.62	2.00	61.00	0.81
Machine 2	0.68	0.68	1.00	59.00	0.68
Machine 3	0.50	0.50	1.00	59.00	0.50
Machine 4	0.54	0.54	1.00	58.00	0.54
Machine 5	0.82	0.82	1.00	57.00	0.82
Machine 6	0.93	0.93	1.00	43.00	0.93

Cost			
	Busy Cost	Idle Cost	Usage Cost
Machine 1	638.39	60.06	0.00
Machine 2	162.85	25.72	0.00
Machine 3	99.38	31.95	0.00
Machine 4	151.44	44.08	0.00
Machine 5	260.58	10.28	0.00
Machine 6	221.47	5.71	0.00

Рис. 6. Отчет по модели «AS-IS» (2-й этап моделирования) с установкой двух единиц оборудования Machine 1

Usage				
	Inst Util	Num Busy	Num Sched	Num Seized
Machine 1	1.00	1.00	1.00	37.00
Machine 2	0.96	0.96	1.00	86.00
Machine 3	0.71	0.71	1.00	85.00
Machine 4	0.78	0.78	1.00	84.00
Machine 5	0.41	0.41	1.00	28.00
Machine 6	0.60	0.60	1.00	28.00

Cost			
	Busy Cost	Idle Cost	
Machine 1	391.01	0.00	
Machine 2	234.94	1.42	
Machine 3	141.76	18.42	
Machine 4	217.74	20.86	
Machine 5	129.77	33.29	
Machine 6	144.67	31.78	

Time				
Waiting Time		Other		
	Average	Number Waiting	Average	
OP1.Queue	71.9111	OP1.Queue	8.6087	
OP2.Queue	26.0140	OP2.Queue	6.4255	
OP3.Queue	0.00	OP3.Queue	0.00	
OP4.Queue	0.06761115	OP4.Queue	0.01183195	
OP5.Queue	0.2767	OP5.Queue	0.01614183	
OP6.Queue	4.1591	OP6.Queue	0.2426	

Total Time				
	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Detail1	122.89	(Insufficient)	55.5407	232.70
Detail2	40.6730	(Insufficient)	13.1811	99.44

Рис. 7. Отчет по модели Модель «ТО-ВЕ»

(«Деталь 1» и «Деталь 2») поточная линия, позволяющая увеличить прибыль в 1,45 раза. Таким образом, система имитационного моделирования позволяет оперативно анализировать производственные процессы и принимать экономически обоснованные решения. Это является особенно актуальным для предприятий с быстро меняющимся ассортиментом продукции, выпуском продукции небольшими сериями.

#### Библиографический список

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
2. Shannon R. E. Introduction to the art and science of simulation / Ed.: Medeiros D. J., Watson E. F., Carson J. S. [et al.] // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. 1998. P. 7–14.
3. Алешина Е. Е., Саломатина А. А., Яблочников Е. И. Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы DELMIA // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 50–53.
4. Nyemba W. R. Modelling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plan //

Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 8. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.007.

5. Высочина О. С., Данич В. Н., Пархоменко В. П. Моделирование производственных процессов на промышленном предприятии при помощи системы имитационного моделирования ARENA // Радиотехника, информатика, управления. 2012. № 1 (26). С. 82–85.
6. Oprea C., Rosca E., Popa A. [et al.]. The quality of service in passenger transport terminals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. P. 1–9.
7. Yan-mei Y., Xin-jun L. Optimization of Ex-warehouse and Warehousing for Logistics Park Based on Computer Simulation // Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC 2016). 2016. P. 1331–1337. DOI: 10.2991/icmctc-16.2016.261.
8. Rusca A., Popa M., Rosca E. [et al.]. Simulation model for port shunting yards // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 145. P. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/145/8/082003.
9. Кожемякина О. П., Гусева Е. Н. Применение имитационного моделирования для совершенствования деятельности строительной фирмы // Современная техника и технологии. 2015. № 6 (46). URL: <http://technology.snauka.ru/2015/06/7094> (дата обращения: 10.04.2018).
10. Кудряшова Э. Е. Визуальное моделирование при разработке бизнес-плана // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 8 (46). С. 104–108.
11. Rao K. D. Modeling, Simulation and Control of the Semi Active Suspension System for Automobiles under MATLAB Simulink using PID Controller // IFAC Proceedings Volumes. 2014. Vol. 47 (1). P. 827–831. DOI: 10.3182/20140313-3-IN-3024.00094.
12. Имитационное моделирование производственных систем / Под общ. ред. А. А. Вавилова. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.
13. Борщёв А. В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015): тр. VII Всерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2015. С. 14–22.
14. Kelton W. D., Sadowsky R. P., Sturrock D. T. Simulation with Arena. 3rd ed., NY: The McGraw-Hill Companies, 2010. 658 p.

**РЕВИНА Ирина Вячеславовна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике».

SPIN-код: 5968-3580

AuthorID (РИНЦ): 419869

AuthorID (SCOPUS): 56826018300

Адрес для переписки: [revina\\_i@rambler.ru](mailto:revina_i@rambler.ru)

**БОЯРКИН Геннадий Николаевич**, доктор экономических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Математические методы и информационные технологии в экономике».

SPIN-код: 2262-9848

AuthorID (РИНЦ): 776216

Адрес для переписки: [mmite\\_omgtu@mail.ru](mailto:mmite_omgtu@mail.ru)

#### Для цитирования

Ревина И. В., Бояркин Г. Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 230–234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234.

Статья поступила в редакцию 26.10.2018 г.

© И. В. Ревина, Г. Н. Бояркин