
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 4, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.10

УДК 519.86

М.В. Жаров

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**ОБЗОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
И ПРОИЗВОДСТВ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Представлены результаты исследования рынка прикладных программ имитационного моделирования с точки зрения возможности и целесообразности использования последних при разработке или оптимизации технологических процессов на предприятиях отечественного машиностроения. Исследованы основные этапы развития программ имитационного моделирования и особенности модифицирования прикладных программ на данных этапах. Анализируются особенности технологических процессов машиностроения и авиастроения на отечественных предприятиях. Изучаются особенности производства металлоемких изделий и полуфабрикатов с точки зрения целесообразности имитационного моделирования данных процессов. Определяется целесообразность проведения имитационного моделирования производств машиностроения, что обеспечивает адекватные результаты анализа при минимальных затратах по сравнению с другими методами моделирования. Определяются основные критерии для выбора конкретной имитационной программы. Отмечается, что наиболее важным преимуществом программных комплексов является не возможность визуализации результатов математического моделирования технологических процессов, а способность программы применять различные доступные механизмы анализа, такие как проведение анализа чувствительности, проведение оптимизации производственной среды, применение метода Монте-Карло, возможность осуществления сценарного анализа. Определено, что обширный набор аналитических инструментов программных сред (анализ узких мест, статистические данные и графики) помогает оценить различные сценарии производства. Рассматриваются различные программы имитационного моделирования, представляющие собой как отечественные, так и зарубежные разработки, которые целесообразно применять при проектировании и оптимизации процессов машиностроения.

Установлено, что все анализируемые программы обеспечивают планирование производства, проектирование производственных помещений и планирование производительности, совершенствование процессов, анализ слабых мест, оптимизацию производственного цикла, оптимизацию ресурсов: персонала и оборудования, обеспечивают планирование запасов (в частности, незавершенного производства и сырья). Определены диапазоны применения данных программ. Установлен ценовой диапазон программ – имитационных сред, пригодных для моделирования производственных процессов машиностроения.

Ключевые слова: машиностроение, производство, моделирование, имитация, технологии, материалоемкость, визуализация, дискретно-событийные подходы, агентное моделирование, страховые запасы, оптимизация ресурсов, производительность.

M.V. Zharov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

REVIEW OF SIMULATION SOFTWARE TOOLS FOR THE STUDY OF TECHNOLOGIES AND INDUSTRIES OF MECHANICAL ENGINEERING

The article presents the results of the market research of applied simulation programs from the point of view of the possibility and expediency of using the latter in the development or optimization of technological processes at domestic machine-building enterprises. The features of technological processes of mechanical engineering and aircraft construction at domestic enterprises are analyzed.

The main stages of the development of simulation modeling programs and the features of modifying application programs at these stages are studied.

The features of the production of metal-intensive products and semi-finished products are studied from the point of view of the feasibility of simulation modeling of these processes. The expediency of conducting simulation modeling of machine-building industries is determined, which provides adequate analysis results at minimal cost compared to other modeling methods. The main criteria for selecting a specific simulation software are defined.

It is noted that the most important advantage of software systems is not the ability to visualize the results of mathematical modeling of technological processes, but the ability of the program to apply various available analysis mechanisms, such as sensitivity analysis, optimization of the production environment, the use of the Monte Carlo method, the possibility of scenario analysis. It is determined that an extensive set of analytical tools of software environments (bottleneck analysis, statistical data and graphs) helps to evaluate various production scenarios. Various simulation modeling programs are considered, representing both domestic and foreign developments that are advisable to use in the design and optimization of mechanical engineering processes.

It is established that all the analyzed programs provide production planning, design of production facilities and productivity planning, process improvement, analysis of weak points, optimization of the production cycle, optimization of resources: personnel and equipment, provide planning of stocks (in particular, work-in-progress and raw materials). In this article, the ranges of application of these programs are defined. The price range of simulation software environments suitable for modeling production processes of mechanical engineering has been established.

Keywords: mechanical engineering, production, modeling, simulation, technologies, material consumption, visualization, discrete-event approaches, agent modeling, insurance stocks, resource optimization, productivity.

Введение

При проектировании технологических процессов изготовления металлоемкой продукции перед технологами стоит необходимость учета множества переменных величин, которые определяют не только особенности самих технологических процессов, но и различные экономические параметры производства. При разработке новых технологических процессов или при оптимизации действующих производств должна рассматриваться не только оптимальность маршрутов материальных потоков, не только определяться правильность расстановки основного технологического оборудования, вспомогательных и транспортных устройств, но должны определяться такие параметры, как подбор оборудования оптимальной производительности, обеспечение высокой загрузки всех видов оборудования в процессе эксплуатации последних, оптимальное количество изделий в партии, своевременность поставки (доставки) материалов и комплектующих к каждому рабочему месту, размеры производственных и страховых запасов перед каждой операцией и т.д.

Произвести математические расчеты с таким большим количеством переменных величин довольно сложно, а в ряде случаев практически невозможно. Ввиду этого в области исследования сложных процессов и систем с большим количеством переменных стало востребовано имитационное моделирование. Можно утверждать, что за последние 20 лет имитационное моделирование приобре-

ло статус самого распространенного инструмента для реализации подобного рода расчетов и исследований. В настоящее время на отечественном рынке программного обеспечения для имитации предлагается более 50 мощных программных средств имитационного моделирования. Всего же на рынке информационных технологий фигурирует около 150 программных продуктов, позволяющих проводить имитационные эксперименты [1].

Известно, что имитационное моделирование подразумевает под собой замену какого-либо явления, процесса или объекта его математической моделью. Дальнейшие операции в рамках имитационного моделирования производятся именно с математической моделью. По своей сути имитационное моделирование представляет собой метод исследования объекта, явления или процесса, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе [2, 3].

Каждая имитационная среда как прикладная программа должна обеспечивать возможность подробного описания любого объекта или явления. С точки зрения организации производственного процесса применение имитационного моделирования позволяет сразу решить несколько вопросов. И в первую очередь это решение вопросов оптимизации производственной логистики, т.е. разработка системы оптимального, согласованного по производительности оборудования, внутрицехового перемещения деталей, заготовок или полуфабрика-

тов, определение уровня производственных запасов перед каждой операцией технологического производства и т.д. Применение имитационного моделирования обладает целым рядом неоспоримых преимуществ:

- можно проводить исследования по различным производственным, управленческим, организационным проектам довольно быстро и не используя никакие материальные ресурсы для реализации проводимых исследований;
- можно рассмотреть как текущее поведение моделируемой системы, так и поведение в ее динамическом развитии в определенном интервале времени (за день, год и т.д.), что позволит оценить перспективы развития системы;
- легко и оперативно можно рассмотреть многовариантность производственных условий, определить наиболее уязвимые, «узкие» места (снижение коэффициента загрузки оборудования, места снижения производительности, определить простои оборудования и др.);
- ответить на все вопросы организации производства, которые начинаются с фразы «что если» [4, 5].

Особенности производства металлоемкой продукции

Рассматривая технологические процессы изготовления материалоемкой продукции машиностроения можно выявить ряд следующих особенностей:

- в процессе производства используется довольно мощное, энергоемкое и дорогостоящее производственное оборудование: литейное оборудование, деформационное оборудование (прокатные станы, молоты, горячештамповочные кривошипные пресса, листогибочные пресса, гидравлические пресса и т.д.), которое характеризуется различными принципами работы, различной интенсивностью (скоростью хода) и разной производительностью;
- в подавляющем большинстве случаев технологический процесс производства материалоемкого изделия характеризуется набором ряда последовательных технологических операций, на которых используются различные виды оборудования, характеризующиеся различной, иногда кардинально отличающейся производительностью, и, соответственно, на двух последовательных операциях требуется различное время на обработку полуфабриката (штучно-калькуляционная норма выполнения операции);
- при использовании горячей деформационной обработки в качестве вспомогательного оборудования необходимо применение печей или раз-

личных нагревательных устройств; следовательно, целесообразно проводить работы по обеспечению сбалансированности производительности вспомогательного печного и основного деформационного оборудования;

- с учетом большого веса обрабатываемых заготовок и полуфабрикатов обязательно требуется применение средств механизации (робототехника, вспомогательные транспортные устройства, манипуляторы и т.д.), которые могут задействовать одновременно как одну, так и несколько единиц основного технологического оборудования [6].

Следовательно, для оптимизации технологических процессов, определения величин производственных запасов и обеспечения сбалансированности производительности основного технологического оборудования с целью уменьшения времени ожидания обработки целесообразно проводить предварительные работы по моделированию проектируемых производственных систем.

Кроме того, большое значение при анализе и построении технологического процесса оказывает серийность производства. В том случае, если изготовление детали идет в условиях массового, крупносерийного и серийного производства, любые изменения в схеме технологического процесса и маршрутах движения полуфабрикатов в цехе производятся только в случае усовершенствования технологии или при приобретении и установке нового оборудования и, как правило, не более одного-двух раз в год. Данные производства не требуют дополнительных работ по моделированию производственной среды с применением программных средств для математического моделирования. В случае реализации производства в условиях мелкосерийного или единичного производства переналадка оборудования, смена ассортимента, изменение маршрутов движения полуфабрикатов в зависимости от условий производства могут проводиться до 15 раз в год.

Анализируя производственные процессы на таких предприятиях отрасли, как АО «Авиастар-СП» (г. Ульяновск), ФГУП «НПЦ газотурбостроения “Салют”» (г. Москва), АО «ВАСО» (г. Воронеж), АО «ОКБ Сухого» (г. Москва) и другие, можно отметить ряд следующих особенностей:

- все производства по изготовлению металлоемкой продукции авиастроения в основном представляют собой синтез технологий металлургического производства (литейное производство, обработка металлов давлением) и последующей механической обработки полученных полуфабрикатов;
- поточное массовое производство отсутствует на всех предприятиях авиастроения; давая

оценку серийности исследуемого производства, целесообразно говорить о мелкосерийном или среднесерийном производстве;

- как правило, даже несмотря на серийность производства, довольно часто происходит смена производимой продукции на каждой конкретной единице технологического оборудования;

- отсутствует нормирование производственных и страховых запасов на каждой операции технологического процесса.

Из практики известно, что для производств с быстро меняющимся ассортиментом продукции, выпуском продукции небольшими сериями актуальными являются следующие задачи: рациональное использование основного технологического оборудования; рациональное использование фонда рабочего времени; повышение коэффициента загрузки оборудования; уменьшение времени простоев, в том числе вследствие несогласованности производительности смежных единиц оборудования; оптимальная величина заделов, вместимость складских помещений. Кроме того, немаловажное значение при построении технологических схем имеют формы организации производственного процесса, временные оценки полного производственного цикла [7, 8].

Таким образом, можно отметить, что по своей сути производственные процессы изготовления металлоемких изделий в авиастроении являются сложными с точки зрения их организации. И именно имитационное моделирование позволяет максимально полно воспроизвести сложные производственные ситуации для всестороннего исследования процессов и оптимизации их организации.

История развития систем имитационного моделирования

Программы имитационного моделирования появились и развиваются исходя из того, что применение данных систем позволяет отказаться от моделирования процессов, объектов и явлений через описание основных характерных признаков последних и их поведения посредством программирования на языках высокого уровня. Они не только обеспечивают снижение трудоемкости по построению моделей, проведению имитационного моделирования, но и обеспечивают возможность применения этих систем специалистами, далекими от программирования (например, технологами или специалистами по автоматизации технологических процессов и производств).

С этой точки зрения можно отметить, что история развития имитационных сред может быть представлена в виде последовательной смены шести поколений [9]:

1. Первое поколение (примерно 1950-е гг.) характеризуется построением имитационных моделей посредством программирования на языках высокого уровня. При этом имитационная модель строится для каждого конкретного процесса, явления или объекта без какой-либо специальной поддержки.

2. Второе поколение (примерно 1960-е гг.) характеризуется специальной поддержкой моделирования в виде соответствующих библиотек подпрограмм, специальных выражений языков программирования, генераторов случайных чисел, средств представления результатов. Уже в период 1960–1965 гг. появляются первые языки моделирования: CSL (язык работ), Simula (язык процессов), Simsript (язык событий), GPSS (язык транзактов).

3. Третье поколение (1970-е гг.) характеризуется интенсивным развитием уже разработанных средств моделирования, ориентированных на повышение эффективности процессов моделирования и превращение имитационного моделирования в более простой и быстрый метод исследования сложных систем. Системы моделирования, разработанные в 1960–1970-е гг., были еще слишком сложны для широкого пользователя, прежде всего из-за сложности текстовой формы описания модели [9, 10].

4. Четвертое поколение (1980-е гг.) характеризуется ориентацией прикладных программ имитационного моделирования на конкретные области применения, на конкретные производственные системы. В это же время начинает активно развиваться анимация в данных системах. Делается ставка на визуализацию процесса создания моделей. Появляются и развиваются такие продукты, как GPSS PC, PC Model simfactory.

5. Пятое поколение (1990-е гг.). В данный период создаются программы, имеющие ярко выраженный графический интерфейс.

6. Шестое поколение (конец 1990-х гг. – наше время). Создаются мощные программные комплексы имитационного моделирования (Arena, Anylogic, ProModel Solutions, Enterprise Dynamics и др.), в которых развиваются важнейшие особенности программных сред пятого поколения [11, 12].

Анализ программ имитационного моделирования для исследования производственных процессов

В настоящее время компьютерное имитационное моделирование широко используется при анализе производственных процессов, анализе транспортных перевозок, в моделировании процессов складирования, при анализе работы различных технических систем, при моделировании характера течения металла и т.д. [13, 14]. В рассматриваемом

анализе будут исследоваться только те системы, которые направлены на исследование производственных процессов и систем.

При выборе имитационной среды необходимо помнить, что исследование динамики функционирования производственного процесса какого-либо предприятия при помощи имитационного моделирования систем позволяет не только найти оптимальный способ организации производства, но и усовершенствовать уже функционирующие процессы, что позволяет без кардинальной перестройки многократно увеличить их эффективность [15, 16].

При выборе программ для проведения имитационного моделирования крайне важно учитывать тот факт, что целесообразным является не создание моделей программированием на языках высокого уровня, а технология построения компьютерных моделей и проведения имитационных экспериментов при помощи уже готовых специализированных компьютерных сред (например, Deneb/Quest, Arena, AnyLogic др.). Имитационные среды не требуют программирования в виде определенной последовательности команд. Вместо написания программы пользователи составляют модель из встроенных графических модулей, заполняют специальные формы, описывающие производственную среду, заполняют информационные таблицы [17, 18].

В практике имитационного моделирования существует три основных подхода, используемых для создания динамических моделей производственных сред и процессов: системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование. Системная динамика предполагает высокий уровень абстракции и в основном используется для задач стратегического уровня: например, чтобы спрогнозировать темп восприятия нового товара на рынке. Дискретно-событийный (процессно-ориентированный) подход используется в основном на операционном и тактическом уровнях, например при моделировании производственных процессов или при оценке инвестиций в оборудование. Агентные модели применяются в задачах разных уровней абстракции; агент может представлять собой любой объект в действии. Именно последние два подхода наиболее приемлемы для имитации производственных сред.

В ряде исследований также отмечается, что особое внимание следует уделять программам, которые работают по принципам дискретно-событийного моделирования или многоподходного имитационного моделирования, как наиболее перспективным и дающим наилучшие результаты имитационных экспериментов. Отмечается, что идея многоподходного имитационного моделиро-

вания довольно проста: она дает возможность органично совмещать и комбинировать методы моделирования так, чтобы достоинства одних подходов компенсировали недостатки других [19].

Другим важным моментом является возможность визуализации и доступные механизмы анализа работы имитационной модели. С точки зрения визуализации для каждой прикладной системы моделирования положительными являются следующие моменты:

- возможность анимации модели и визуализации данных;
- возможность 3D-анимации;
- возможность просмотра работы модели в режиме реального и ускоренного времени.

Для сравнительной оценки также важно исследовать доступные механизмы анализа имитационной среды. Программный продукт является конкурентоспособным, если он обеспечивает:

- возможность проведения анализа чувствительности;
- возможность проведения оптимизации производственной среды;
- применение метода Монте-Карло;
- возможность осуществления сценарного анализа [20, 21].

На основе вышеперечисленных критериев отбора имитационных сред были определены наиболее перспективные программные продукты для проведения моделирования производственных процессов, представленные на отечественном рынке и успешно применяемые для имитационного моделирования производственных процессов металлоемких производств на предприятиях машиностроения.

В таблице представлены сведения по наиболее перспективным программным продуктам отечественного рынка программ имитационного моделирования.

Все вышеперечисленные прикладные программы могут использоваться для моделирования производственного процесса изготовления материалоёмких деталей. Данные прикладные программы обеспечивают:

- планирование производства;
- проектирование производственных помещений и планирование производительности;
- совершенствование процессов, анализ слабых мест;
- оптимизацию производственного цикла;
- оптимизацию ресурсов: персонала и оборудования;
- планирование запасов (в частности, незавершенного производства и сырья) [22, 23].

Прикладные программы для имитационного моделирования
производственных процессов металлоемких производств

№ п/п	Наименование программы имитационного моделирования	Разработчик	Сайт программного продукта, разработчика или дистрибьютора в Российской Федерации
1	Arena	Rockwell Automation Inc., Wexford, PA, США	http://www.arenasimulation.com
2	AutoMod	Brooks Automation, США	http://www.automod.se/eng/home.html
3	AnyLogic	ООО «Экс Джей Текнолоджис» (XJ Technologies), Российская Федерация	http://www.anylogic.ru
4	AweSim	Symix Systems Inc., США	–
5	Deneb / Quest	BNP Deneb Pty Ltd., Австралия	http://deneb.com.au
6	Enterprise Dynamics	Incontrol Simulation Solutions, Нидерланды	http://www.incontrolsim.com
7	Flexsim	FlexSim Software Products Inc. (FSP), Orem, США	http://www.flexsim.com
8	Tecnomatix Plant Simulation	Siemens Industry Software, Германия	–
9	ProModel Solutions	ProModel Corporation, США	http://www.promodel.com
10	Simplex3	–	http://www.simplex3.net
11	Simul8	Corporate Headquarters, Boston, США	http://www.simul8.com
12	Witness	The Lanner Group Ltd, США	http://www.witness-for-simulation.com

При выборе имитационной среды необходимо учитывать тот факт, что исследование динамики функционирования производственного процесса предприятия при помощи имитационного моделирования систем позволяет не только найти оптимальный способ организации производства, но и усовершенствовать уже функционирующие процессы, что позволяет без кардинальной перестройки многократно увеличить их эффективность [24, 25].

Безусловно, выбор той или той имитационной среды лежит исключительно на конкретном потребителе. Немаловажным фактором является и стоимость программного продукта. Она варьируется в пределах от порядка 360 000 руб. за программу имитационного моделирования AnyLogic 6.3.1 (разработчик – ООО «Экс Джей Текнолоджис» (XJ Technologies), РФ) до примерно 760 000 руб. за программный продукт Arena 12.0 (разработчик – Rockwell Automation Inc. (Systems Modeling), США) [9].

Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований обоснована целесообразность использования имитационного моделирования в специальных прикладных средах при проектировании и оптимизации производственных систем по изготовлению металлоемких деталей предприятиями отечественного машиностроения. Очевидно, что другие методы моделирования (математические, натурные, физические и др.) малоприменимы для моделирования сложных систем, к которым можно отнести производственные среды. Это обусловлено сложностью реализации данных методов моделирования (например, физического или натурального метода моделирования) и дороговизной реализации методов.

Сформулированы основные требования к имитационным программам и критерии их отбора для проведения имитационного моделирования. Исследованы возможности программных сред имитационного моделирования как отечественных, так и зарубежных разработчиков, представленных на современном российском рынке информационных технологий.

Выбор предприятием той или иной программы имитационного моделирования должен вестись не только на основе выявленных возможностей программных сред, он также зависит от ряда дополнительных факторов:

- от наличия опыта специалистов конкретного предприятия в области работы с той или иной программой имитационного моделирования, возможности организации обучающих курсов и тренингов на сайте разработчика;
- возможности бесплатного дистанционного обучения работе с программой;
- стоимости программной среды;
- возможности организации оперативного консультирования разработчиком программного продукта или специалистами его дилерского центра, возможности организации оперативной технической поддержки.

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. 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
2. Белоусов В.Е., Крахт Л.Н., Поцбнева И.В. Модель построения оптимальной структуры бизнес-

процессов в системе организационного управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 195–197.

3. Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение, 1983. – 416 с.

4. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 737 с.

5. Shannon R.E. Introduction to the art and science of simulation / ed. D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson [et al.] // Proceed. of the 1998 Wint. Simul. Conf., USA, Washington, 13–16 December 1998. – Washington, 1998. – P. 7–14.

6. Свирцев В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 116 с.

7. Машиностроение: энцикл. / ред. совет: К.В. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1996 (Т. III-2. Технологии заготовительных производств / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова). – 736 с.

8. Современные технологии авиастроения / А.Г. Братухин, Ю.Л. Иванов, Б.Н. Марьин [и др.]; под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.

9. Михеева Т.В. Обзор существующих программных средств имитационного моделирования при исследовании механизмов функционирования и управления производственными системами // Журнал теоретических и прикладных исследований «Изн. Алт. гос. ун-та». Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1 (61). – С. 87–90.

10. Yan-mei Y., Xin-jun L. Optimization of ex-warehouse and warehousing for logistics park based on computer simulation // Proceed. of the 2016 3rd Int. Conf. on Materials Eng., Manuf. Techn. and Control (ICMEMTC 2016), China, Taiwah, 26–27 February 2016. – China, Taiwah, 2016. – P. 1331–1337. DOI: 10.2991/icmemtc-16.2016.261

11. Kelton W.D., Sadowsky R.P., Sturrock D.T. Simulation with Arena. – 3rd ed. – NY: The McGraw-Hill Companies, 2010. – 658 p.

12. The quality of service in passenger transport terminals / С. Oprea, E. Rosca, A. Popa [et al.] // IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. – 2016. – Vol. 161. – P. 1–9.

13. Кокарева В.В., Смелов В.Г., Шитарев И.Л. Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции «бережливое производство» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34). – С. 131–134.

14. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. – СПб.: Наука, 2006. – 723 с.

15. Nyemba W.R. Modeling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plan // Procedia Manuf. – 2017. – Vol. 8. – P. 59–66.

16. Анализ программ имитационного моделирования для совершенствования процессов и конструкций / И.В. Почебнева, А.В. Иванова, К.Д. Иварлак, О.В. Ермакова // Современные инновации в науке и технике: материалы 8-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Воронеж, 19–20 апреля 2018 г. – Воронеж, 2018. – С. 162–166.

17. Оптимизация производственных процессов с помощью моделирования в программной среде AnyLogic

на предприятиях авиационной и ракетно-космической отрасли / И.Н. Васимова, Н.Е. Садковская, Б.П. Садковский, М.В. Жаров // Научно-технологические технологии: науч.-техн. журн. – 2018. – № 6. – С. 18–24.

18. Жаров М.В. Имитационное моделирование производственной среды цехов механической обработки // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 5. – С. 34–37.

19. Кудряшова Э.Е. Визуальное моделирование при разработке бизнес-плана // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 8 (46). – С. 104–108.

20. Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ: электрон. журн. – 2013. – Вып. № 65. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (дата обращения: 12.06.2021).

21. Алешина Е.Е., Саломатина А.А., Яблочников Е.И. Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы DELMIA // Науч.-техн. вестник С.-Петерб. гос. ун-та информ. техн., механ. и оптики. – 2011. – № 1 (71). – С. 50–53.

22. AnyLogic. Справочное руководство по Enterprise Library / XJ Technologies Company Ltd. Technologies. – М., 2004. – 134 с.

23. Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде AnyLogic // Вестник Рязан. гос. радиотехн. ун-та. – 2020. – № 71. – С. 151–161.

24. Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде Tecnomatix Plant Simulation: лаб. практикум / И.Г. Абрамова, Н.Д. Проничев, Д.А. Абрамов, Т.Н. Коротенкова. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014. – 80 с.

25. Рванцов Ю.А. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования деловых процессов по критерию функциональной полноты // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, № 1 (52). – С. 69–72.

References

1. Revina I.V., Boiarkin G.N. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennogo protsessa izgotovleniia detalei [Simulation modeling of the manufacturing process of parts]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2018, no. 6 (162), pp. 230–234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234

2. Belousov V.E., Krakht L.N., Potsebneva I.V. Model' postroeniia optimal'noi struktury biznes-protsessov v sisteme organizatsionnogo upravleniia [Model for building an optimal structure of business processes in the organizational management system]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 195–197.

3. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh sistem [Simulation modeling of production systems]. Ed. A.A. Vavilova. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 416 p.

4. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. Imitatsionnoe modelirovanie [Simulation modeling]. Moscow: Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2008, 737 p.

5. Shannon R.E. Introduction to the art and science of simulation. Ed. D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson et al. *Proceed. of the 1998 Wint. Simul. Conf.*, 1998, pp. 7–14.

6. Svirshchev V.I. Optimizatsiia tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoi obrabotki [Optimization of machining processes]. Izdatelstvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, 116 p.
7. Mashinostroenie: entsiklopediia [Mechanical Engineering: Encyclopedia]. Ed. K.V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie. Vol. III-2. Tekhnologii zagotovitel'nykh proizvodstv. Ed. V.F. Manuilova. 1996, 736 p.
8. Bratukhin A.G., Ivanov Iu.L., Mar'in B.N. [et al.]. Sovremennye tekhnologii aviastroeniia [Modern aircraft engineering technologies]. Ed. A.G. Bratukhina, Iu.L. Ivanova. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 832 p.
9. Mikheeva T.V. Obzor sushchestvuiushchikh programm-nykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniia pri issle-dovanii mekhanizmov funktsionirovaniia i upravleniia proizvodstvennymi sistemami [Review of existing simulation software in the study of mechanisms of functioning and management of production systems]. *Zhurnal teoreticheskikh i prikladnykh issledovani. Seriia Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2009, no. 1 (61), pp. 87–90.
10. Yan-mei Y., Xin-jun L. Optimization of ex-warehouse and warehousing for logistics park based on computer simulation. *ICMEMTC 2016*, 2016, pp. 1331–1337. DOI: 10.2991/icmemtc-16.2016.261
11. Kelton W.D., Sadowsky R.P., Sturrock D.T. Simulation with Arena. 3rd. NY: The McGraw-Hill Companies, 2010, 658 p.
12. C. Oprea, E. Rosca, A. Popa et al. The quality of service in passenger transport terminals. *IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng.*, 2016, vol. 161, pp. 1–9.
13. Kokareva V.V., Smelov V.G., Shitarev I.L. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov v ramkakh kontseptsii «berezhlivoe proizvodstvo» [Simulation modeling of production processes within the concept of "lean manufacturing"]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (34), pp. 131–134.
14. Karpov Iu.G. Imitatsionnoe modelirovanie sistem [Simulation modeling of systems]. Saint-Petersburg: Nauka, 2006, 723 p.
15. Nyemba W.R. Modeling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plan. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 8, pp. 59–66.
16. Potsebnova I.V., Ivanova A.V., Ivarlak K.D., Ermakova O.V. Analiz programm imitatsionnogo modelirovaniia dlia sovershenstvovaniia protsessov i konstruksii [Analysis of simulation programs to improve processes and designs]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike*, 2018, pp. 162–166.
17. Vasimova I.N., Sadkovskaia N.E., Sadkovskii B.P., Zharov M.V. Optimizatsiia proizvodstvennykh protsessov s pomoshch'iu modelirovaniia v programmnoi srede AnyLogic na predpriiatiakh aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi otrasli [Optimization of production processes using simulation in AnyLogic software environment at enterprises of aerospace and rocket and space industries]. *Naukoemkie tekhnologii*, 2018, no. 6, pp. 18–24.
18. Zharov M.V. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennoi sredy tsekhov mekhanicheskoi obrabotki [Simulation modeling of the production environment of machining shops]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2020, no. 5, pp. 34–37.
19. Kudriashova E.E. Vizual'noe modelirovanie pri razrabotke biznes-plana [Visual modeling when developing a business plan]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 8 (46), pp. 104–108.
20. Kabanov A.A. Imitatsionnoe modelirovanie v proizvodstve aviatsionnykh i raketno-kosmicheskikh sis-tem. Chto predshestvuet eksperimentu? [Simulation modeling in the production of aeronautical and rocket-space systems. What precedes the experiment?]. *Trudy MAI: elektronnyu zhurnal*, 2013, no. 65. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (data obrashcheniia: 12.06.2021).
21. Aleshina E.E., Salomatina A.A., Iablochnikov E.I. Sozdanie imitatsionnoi modeli sborochnoi linii s ispol'zovaniem sistemy DELMIA [Creating a simulation model of an assembly line using the DELMIA system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta inform. tekhn., mekhanika i optiki*, 2011, no. 1 (71), pp. 50–53.
22. AnyLogic. Spravochnoe rukovodstvo po Enterprise Library. XJ Technologies Company Ltd. Technologies. Moscow, 2004, 134 p.
23. Zharov M.V. Modelirovanie optimizatsii dlia organizatsii proizvodstv tsekhov mashinostroeniia v programmnoi srede AnyLogic [Optimization modeling for the organization of machine shops in the AnyLogic software environment]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 71, pp. 151–161.
24. Abramova I.G., Pronichev N.D., Abramov D.A., Korotenkova T.N. Imitatsionnoe modelirovanie organizatsii proizvodstvennykh protsessov mashinostroitel'nykh predpriatii v instrumental'noi srede Tesnomatix Plant Simulation [Simulation modeling of the organization of production processes of machine-building enterprises in the tool environment Tecnomatix Plant Simulation]. Izdatelstvo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2014, 80 p.
25. Rvantsov Iu.A. Sravnitel'nyi analiz sistem imitatsionnogo modelirovaniia delovykh protsessov po kriteriiu funktsional'noi polnoty. *Vestnik DGTU*, 2011, vol. 11, no. 1 (52), pp. 69–72.

Получено 14.06.2021

Принято 10.11.2021

Опубликовано 30.12.2021

Сведения об авторе

Жаров Максим Владимирович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и систем автоматизированного проектирования технологических процессов Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: MaximZharov@mail.ru.

About the author

Maxim V. Zharov (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technologies and Systems of Automated Design of Technological Processes, Moscow Aviation Institute (National Research University), e-mail: MaximZharov@mail.ru.