

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

С.Н. Григорьев¹

s.grigoriev@stankin.ru

В.А. Долгов^{1,2}

dolgov@digitalfabrika.ru

П.А. Никишечкин^{1,2}

npa@digitalfabrika.ru

С.С. Ивашин²

iss@digitalfabrika.ru

Н.В. Долгов²

dnv@digitalfabrika.ru

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

² ООО «Фабрика Цифровых Систем», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные методы имитационного моделирования, их применимость и подходы к имитационному моделированию производственных процессов производственно-логистических систем различных типов машиностроительных производств. Приведено описание производственно-логистических систем машиностроительных предприятий. Выделены их основные классификационные признаки, такие как число операций, выполняемых на одном рабочем месте, разнообразие номенклатуры и типы производственных процессов. Определены особенности имитационного моделирования производственных процессов в массовом и серийном производстве. Показаны перспективы использования систем оперативно-календарного планирования в совокупности с системами имитационного моделирования для машиностроительных производств серийного типа. Рассмотрены основные различия при использовании систем имитационного моделирования и оперативно-календарного планирования для оценки возможности выполнения производственной программы. Проанализированы существующие программные решения для имитационного моделирования производственных процессов различных машиностроительных производств и потенциальные преимущества их использования совместно с системами оперативно-календарного планирования. Предложен подход к формированию имитационных моделей производственно-логистических

Ключевые слова

Имитационное моделирование, производственно-логистическая система, машиностроительное предприятие, производственное расписание, цифровой двойник, концепция «Индустрия 4.0»

систем предприятий с комбинированным типом производства, применение которого позволяет повысить адекватность моделирования производственно-логистических систем

Поступила 13.09.2021

Принята 20.12.2021

© Автор(ы), 2022

Введение. В настоящее время методы математического анализа и моделирования производственных процессов машиностроительных предприятий приобретают все большую актуальность. Во многом это обусловлено высокими требованиями к уровню проектирования и эксплуатации производственных подразделений машиностроительных предприятий.

Имитационное моделирование — это метод анализа поведения системы, основанный на том, что исследуемая система заменяется математической моделью, что позволяет имитировать работу исследуемой системы и взаимодействие всех ее элементов, не прибегая к экспериментам на реальном объекте [1–3]. Объект исследования создается в виде логико-математического описания, которое используется для анализа и оценки его функционирования путем имитационного моделирования. По результатам можно оценить поведение объекта моделирования во времени при различных исходных условиях.

Выделяют три основных метода имитационного моделирования: агентный, системной динамики и дискретно-событийный. Агентный метод имитационного моделирования используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется результатами индивидуальной активности их элементов. Метод системной динамики позволяет реализовать моделирование исследуемой системы путем построения математических зависимостей, графических диаграмм причинных связей и влияния одних параметров на другие во времени, затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере. Метод дискретно-событийного моделирования основан на фиксации событий начала и окончания моделируемых процессов, например ожидание, обработка, движение с грузом, разгрузка и др. Этот метод моделирования наиболее развит и имеет широкую сферу применения: от транспортной логистики и систем массового обслуживания до производственных систем. Для имитационного моделирования процессов машиностроительных производств дискретно-событийный метод является наиболее распространенным и позволяет определить поведение производственных систем во времени. Основным критерием, определяющим необходимость применения имитационного моделирования для анализа поведения производственных процессов, является сложность, а зача-

стью и невозможность описания математическими зависимостями функционирования производственной системы [4–8].

Подходы к имитационному моделированию различных типов машиностроительных производств. В настоящей работе в качестве объекта моделирования рассматривается производственно-логистическая система (ПЛС) машиностроительного предприятия, в которой выполняются процессы изменения и управления материальным потоком при осуществлении заданной производственной программы выпуска. Практика использования имитационного моделирования применительно к машиностроительным предприятиям свидетельствует о существенных особенностях применения методов имитационного моделирования для различных ПЛС [3, 9–12].

Рассмотрим типы машиностроительных производств, их основные особенности и целесообразность применения к ним различных методов имитационного моделирования. Для определения методов моделирования производственных процессов ПЛС машиностроительных предприятий в качестве их основных классификационных признаков выделены следующие: непрерывность или дискретность процессов, число выпускаемых номенклатурных позиций.

Производственные процессы на машиностроительных предприятиях можно разделить на непрерывные и дискретные. Производственно-логистические системы предприятий с непрерывно протекающими производственными процессами представляют собой совокупность технологических операций, которые имеют жесткие логистические связи и выполняются непрерывно. Номенклатура продукции непрерывного производства измеряется единицами.

Производственно-логистические системы предприятий с дискретно протекающими производственными процессами характеризуются наличием промежуточного хранения предметов труда между технологическими операциями. Номенклатура дискретного производства может достигать тысячи и более номенклатурных позиций. Технологические решения изготовления изделий на дискретном производстве основаны на применении гибких логистических связей между рабочими местами и допускают использование альтернативных технологических процессов [5, 13].

Тип производства определяется с учетом числа технологических операций, выполняемых на одном рабочем месте, и числа номенклатурных позиций. Выделяют три типа производства: единичное, серийное и массовое.

Производственно-логистические системы предприятий с единичным и серийным типами производства характеризуются дискретно протекаю-

щими производственными процессами, ПЛС предприятий с массовым типом производства — непрерывно протекающими процессами.

Единичное производство характеризуется большим числом номенклатурных позиций изделий, которые изготавливаются в малых количествах и, как правило, не повторяются. Применяется укрупненное описание технологических процессов, определяющее состав технологических операций без детализации их содержания. В технологической документации привязка технологической операции к рабочему месту не указывается. Нормирование длительности каждой операции задают укрупненно. Описание ПЛС предприятия с единичным производством плохо формализуемо. Таким образом, можно утверждать об отсутствии формализованного описания модели продукт–процесс–ресурс. С учетом указанных особенностей построенная модель будет иметь высокий уровень абстракции и низкий уровень достоверности результатов моделирования. В связи с этим имитационное моделирование для анализа поведения ПЛС предприятия с единичным производством имеет узкую область назначения и на практике применяется редко [14, 15].

Выпуск изделий серийного производства осуществляется периодически заданными партиями. Производственно-логистическая система предприятия с серийным типом производства характеризуется большой номенклатурой изготавливаемых изделий и наличием периодически выполняемых процессов. Технологическая документация содержит операционное описание технологических процессов, включая нормирование операций и их связи с рабочими местами (ресурсами).

Массовое производство характеризуется малым числом номенклатурных позиций и большим объемом выпуска. Описание производственных процессов ПЛС предприятия с массовым типом производства имеет высокий уровень детализации. Такие ПЛС являются традиционным объектом для имитационного моделирования [6].

Следовательно, можно выделить два основных типа машиностроительных производств, для которых целесообразно применение имитационного моделирования: серийный и массовый. Рассмотрим особенности построения имитационных моделей для каждого типа машиностроительного производства (таблица).

Производственно-логистическая система предприятия с серийным типом производства является нестабильной и имеет большое число материальных потоков. Последовательность запуска в производство изделий заданной номенклатуры, измеряемой сотнями и тысячами позиций, опре-

Имитационное моделирование машиностроительных производств различных типов

Тип машиностроительного производства			Подход к имитационному моделированию	Инструмент для реализации имитационной модели
По числу операций, выполняемых на одном рабочем месте	По разнообразию номенклатуры	По типу протекаемых процессов		
Единичное			Имитационное моделирование применяется ограниченно	-
Серийное	Много-номенклатурное	Дискретное	Перспективная область применения имитационного моделирования. Маршрутизация материального потока задается производственным расписанием	PlantTwin
Массовое	Мало-номенклатурное	Непрерывное	Традиционная область применения имитационного моделирования. Маршрутизация материального потока задается с помощью логических правил	AnyLogic, PlantSimulation, DELMIA и др.

деляется производственным расписанием. В результате проведенных авторами исследований выявлено, что применение ситуационной логики маршрутизации материального потока не позволяет учесть приоритетность изготовления той или иной номенклатурной позиции, например задание более высокого приоритета изделиям длинного цикла изготовления, лежащих на критическом пути, производство входящих в один машинокомплект деталей, а также резервирование рабочих мест для изготовления наиболее приоритетных деталей и др. Результаты имитационного моделирования во многом определяются заданной для моделирования последовательностью запуска изделий в производство. Значительная вариативность последовательности запуска изделий в производство является основным сдерживающим фактором применения имитационного моделирования систем серийного производства. Поэтому маршрутизацию материального потока предложено задавать производственным расписанием [2].

Построение производственного расписания реализуется в MES/APS системе, затем передается в систему имитационного моделирования для моделирования выполнения расписания с учетом влияния заданных производственных процессов и событий (отказов оборудования, работы технического обслуживания и ремонта, непостоянного времени выполнения операций, переналадки рабочих мест и т. д.), наступление и длительность которых может задаваться и случайными величинами.

Производственно-логистическая система предприятия с малономенклатурным массовым типом производства относительно стабильная и имеет малое число материальных потоков. Построение имитационной модели такой ПЛС реализуется с использованием детального описания элементов производственной системы, логистических и временных связей между ними, а также логики выполнения процессов. Последовательность запуска в производство изделий заданной номенклатуры, учитывая их малое число, можно задавать вручную. Маршрутизация материального потока определяется ситуационной логикой между элементами технологической системы. При выполнении производственных процессов задается логика взаимодействия элементов технологического, транспортного и складского оборудования [16].

Выбор инструментальных средств построения имитационных моделей различных типов производств. В соответствии с изложенным выделены схемы информационных потоков при моделировании производственных процессов ПЛС предприятий с серийным и массовым типами производства (рис. 1).

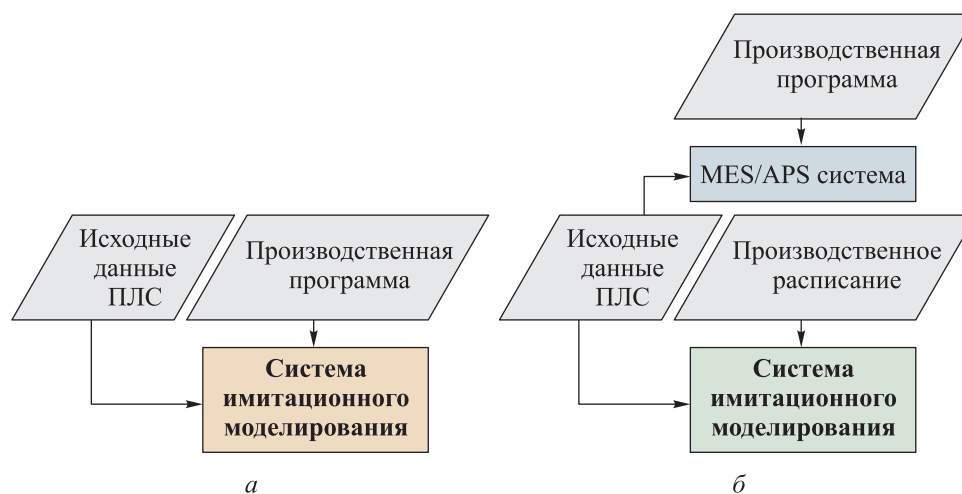


Рис. 1. Схемы информационных потоков при моделировании производственных процессов ПЛС предприятий с массовым (а) и серийным (б) типами производства

В настоящее время существует широкий спектр систем имитационного моделирования, позволяющих создавать имитационные модели различных процессов и проводить эксперименты для достижения поставленных целей. Среди наиболее применяемых можно выделить: PlantSimulation (Siemens, Германия), AnyLogic (The AnyLogic Company, США), PlantTwin («Амальгама», Россия), Arena (Rockwell Automation, США), DELMIA (Dassault Systèmes SE, Франция) и др. [16–18]. Таким образом, для моделирования ПЛС предприятия с массовым производством могут применяться традиционные решения, используемые в системах AnyLogic, PlantSimulation, DELMIA и других, имеющих развитый инструментарий описания ситуационной логики маршрутизации материальных потоков.

Для формирования имитационной модели ПЛС предприятия с серийным типом производства перечисленные системы применять не рекомендуется. В настоящей работе для решения этой задачи предлагается рассмотреть систему имитационного моделирования PlantTwin компании «Амальгама» (Россия) [17, 18].

Система имитационного моделирования PlantTwin позволяет проводить моделирование по производственному расписанию, сгенерированному как внешними системами, так и встроенным модулем планирования, что является ее важным преимуществом. Встроенный модуль планирования дает возможность проверить теоретическое исполнение производственной программы и сгенерировать производственное расписание по одной из нескольких стратегий планирования [19]. Подобная функциональность важна,

поскольку на практике не всегда есть возможность сформировать производственное расписание в сторонних MES/APS системах при изменении входных данных для моделирования ситуаций «что будет, если?».

Применение комбинированного подхода для реализации имитационных моделей смешанных типов производств. Несмотря на приведенную классификацию машиностроительных производств, в реальности в рамках одного машиностроительного предприятия зачастую можно выделить отдельные участки, относящиеся к различным типам производства. Так, на предприятиях с массовым типом производства могут функционировать участки, относящиеся к серийному типу производства, например инструментальные. При этом в серийном производстве также могут применяться системы массового производства, например цех литья по выплавляемым моделям, сборочные цеха.

В настоящей работе предложен комбинированный подход к формированию имитационных моделей ПЛС предприятия с различными типами производства. Суть комбинированного подхода заключается в декомпозиции машиностроительного производства на отдельные производственные подразделения с различными типами производства и в построении для каждого подразделения имитационной модели с учетом приведенных особенностей.

В результате анализа ПЛС предприятия с различными типами производства выявлено, что наиболее распространенными являются следующие модели:

- производственные подразделения с массовым типом производства, например цеха заготовительного производства — поставщики предметов труда для подразделений с серийным типом производства;
- производственные подразделения с серийным типом производства — поставщики предметов труда для подразделений с массовым типом производства, например сборочные цеха.

Модель ПЛС предприятия с различными типами производства, в которой цеха одного типа производства являются поставщиками и потребителями предметов труда цехов с другим типом производства, редко применяется на практике, и имитационное моделирование для нее не используется [20, 21].

При построении комбинированной имитационной модели необходимо обеспечить согласованные производственные планы для подразделений с различными типами производства. Таким образом, для создания комбинированной имитационной модели ПЛС (рис. 2) предлагается метод, при котором элементы этой системы, относящиеся к массовому производству,

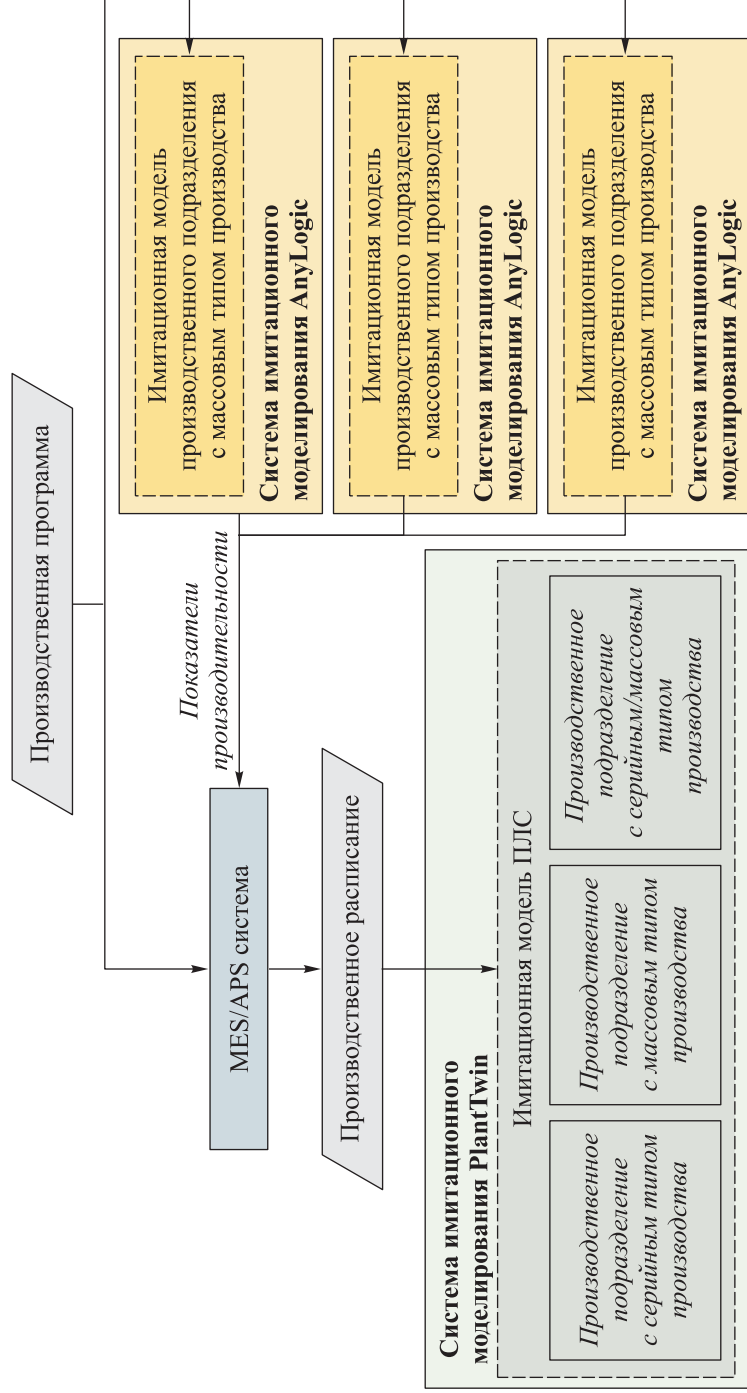


Рис. 2. Имитационная модель ПЛС машиностроительного предприятия с комбинированным типом производства

на первом этапе описываются в среде моделирования AnyLogic, где определяются показатели их производительности.

На втором этапе эти элементы производственной системы реализуются в PlantTwin в виде черных ящиков с заданными временными интервалами работы и поведением при различных входных воздействиях, определенных при моделировании в среде AnyLogic. Имитационные модели элементов ПЛС предприятия с серийным типом производства реализуются в PlantTwin.

Комбинированная имитационная модель ПЛС предприятия с различными типами производства приведена на рис. 2. Основным инструментом для разработки конечной имитационной модели является среда PlantTwin, в которой описаны параметры работы элементов ПЛС. Для описания элементов ПЛС, относящихся к поточному производству, используются данные, полученные в среде AnyLogic. Такой подход позволяет повысить общую адекватность имитационной модели и описать работу сложной ПЛС, состоящей из различных процессов.

Заключение. Рассмотрены особенности имитационного моделирования производственных процессов различных типов машиностроительных производств. Показано, что исследование поведения технологической системы единичного типа производства путем имитационного моделирования нецелесообразно ввиду значительной номенклатуры, отсутствия требуемых исходных данных, невозможности обеспечить необходимую адекватность модели. Определены особенности имитационного моделирования производственных процессов в массовом и серийном типах производства. Имитационное моделирование производственных процессов ПЛС машиностроительных предприятий с серийным типом производства направлено на анализ поведения этой системы при выполнении производственной программы в соответствии с заданным производственным расписанием. Имитационное моделирование производственных процессов предприятия с массовым типом производства направлено на анализ поведения ПЛС при выполнении производственной программы в соответствии с заданной логикой маршрутизации.

Рассмотрены существующие решения для моделирования производственных процессов различных типов производства. Применение комбинированного метода имитационного моделирования позволяет повысить адекватность моделирования ПЛС машиностроительных предприятий с различными типами производства, использовать преимущества каждого предложенного подхода к формированию имитационных моделей и нивелировать недостатки применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горелова Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2013, № 3, с. 239–250.
- [2] Толуев Ю.И. Задачи имитационного моделирования при реализации концепции Индустрия 4.0 в сфере производства и логистики. *ИММОД-2017*. СПб., НОИМ, 2017, с. 57–65.
- [3] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 517–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.051>
- [4] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 43–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>
- [5] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки. *Сб. тр. науч.-практ. конф. «Цифровая трансформация экономики и промышленности»*. СПб., СПбПУ, 2019, с. 234–245.
- [6] Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Телешевский В.И. и др. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства. *Измерительная техника*, 2012, № 11, с. 56–59.
- [7] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Леонов А.А. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест. *Автоматизация. Современные технологии*, 2021, № 1, с. 3–10.
- [8] Grigoriev S.N., Kozochkin M.P., Sabirov F.S., et al. Diagnostic systems as basis for technological improvement. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 599–604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.05.006>
- [9] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Умнов П.И. и др. Оценка станкостроительности изготовления гражданской продукции на машиностроительных предприятиях ОПК. *Автоматизация. Современные технологии*, 2021, т. 75, № 7, с. 291–295.
- [10] Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E., et al. PlantTwin simulation system as a tool for verifying production plans and supporting decision-making to improve the efficiency of machine-building industries. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 329, art. 03075. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903075>
- [11] Архангельский В.Е. Требования к системам планирования производства в контексте концепции «Индустрия 4.0» VII Междунар. форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России», 2018. URL: <http://xn--hlaelen.xn--plai/wp-content/uploads/2018/05/Arhangelskij.pdf> (дата обращения: 18.02.2020).
- [12] Grigoriev S.N., Martinov G.M. An ARM-based multi-channel CNC solution for multi-tasking turning and milling machines. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 525–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036>

- [13] Долгов В.А., Никишечкин П.А., Архангельский В.Е. и др. Модели управления производственными системами машиностроительных предприятий на основе разработки и использования их цифровых двойников. *Моделирование нелинейных процессов и систем. Матер. 5 Междунар. конф.* М., Янус-К, 2021, с. 171–176.
- [14] Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., et al. Integration of different computer-aided systems in product designing and process planning on digital manufacturing. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 476–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.247>
- [15] Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., et al. Competitive-resource information model of the machine building manufacturing system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012008>
- [16] Система имитационного моделирования AnyLogic. *anylogic.ru: веб-сайт*. URL: <https://anylogic.ru> (дата обращения: 18.02.2020).
- [17] Система имитационного моделирования PlantTwin. *plant-twin.com: веб-сайт*. URL: <https://plant-twin.com> (дата обращения: 18.02.2020).
- [18] Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Черненко В.Е. и др. Система имитационного моделирования PlantTwin как инструмент верификации производственных планов и поддержки принятия решений для повышения эффективности производства. *Вестник машиностроения*, 2021, № 3, с. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-3-80-85>
- [19] Малыханов А.А., Черненко В.Е. От имитационной модели к цифровому двойнику: анализ опыта выполнения коммерческих проектов. *9 Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности*. Екатеринбург, УрГПУ, 2019, с. 37–46.
- [20] Grigoriev S.N., Martinov G.M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized CNC systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 858–863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031>
- [21] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Рахмилевич Е.Г. Метод оценки производственной технологичности изделий на основе применения семантических моделей в условиях цифрового производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 12, с. 16–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-16-25>

Григорьев Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1).

Долгов Виталий Анатольевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1); генеральный директор ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Никишечкин Петр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1); заместитель генерального директора по информационным технологиям ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Ивашин Сергей Сергеевич — ведущий инженер ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Долгов Никита Витальевич — инженер ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 3 (142), с. 84–99. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>

**SIMULATION MODELING PRODUCTION PROCESSES
OF VARIOUS TYPES OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES**

S.N. Grigoriev¹

V.A. Dolgov^{1,2}

P.A. Nikishechkin^{1,2}

S.S. Ivashin²

N.V. Dolgov²

s.grigoriev@stankin.ru

dolgov@digitalfabrika.ru

npa@digitalfabrika.ru

iss@digitalfabrika.ru

dnv@digitalfabrika.ru

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russian Federation

² LLC “Digital Systems Factory”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the main methods of simulation modeling, their applicability and approaches to simulation modeling production processes of manufacture and logistics systems of machine-building enterprises. The types of manufacture and logistics systems of machine-building enterprises are described. Their main classification features are pointed out such as the number of operations performed at one workplace, the variety of nomenclature as well as types of production processes. The features of simulation modeling production processes in mass and serial production are determined. The prospects for the use of operational scheduling systems in conjunction with simulation systems for machine-building enterprises of a serial type are shown. The main differences are considered in the use of simula-

Keywords

Simulation modeling, manufacture and logistics system, machine-building enterprise, production schedule, digital twin, concept “Industry 4.0”

tion modeling and operational scheduling systems for assessing the feasibility of a production program. The existing software solutions for simulation modeling production processes of various machine-building enterprises are analyzed and the potential advantages of their use in conjunction with operational scheduling systems are described. An approach to the formation of simulation models of manufacture and logistics systems with a combined type of production is proposed, the use of which allows increasing the adequacy of modeling manufacture and logistics systems with various types of production.

Received 13.09.2021

Accepted 20.12.2021

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Gorelova G.V. Cognitive approach to simulation of large systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, no. 3, pp. 239–250 (in Russ.).
- [2] Toluev Yu.I. [Simulation tasks during the implementation of the industry 4.0 concept in the field of production and logistics]. *IMMOD-2017*. St. Petersburg, NOIM Publ., 2017, pp. 57–65 (in Russ.).
- [3] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 517–522.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.051>
- [4] Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., et al. Development of a structural model of a digital twin of machine-building enterprises production and logistics system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 43–58 (in Russ.).
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>
- [5] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Digital twins: definition, approaches and methods of development]. *Sb. tr. nauch.-prakt. konf. "Tsifrovaya transformatsiy ekonomiki i promyshlennosti"* [Proc. Sc.-Pract. Conf. "Digital Transformation of Economy and Industry"]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 234–245 (in Russ.).
- [6] Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskiy V.I., et al. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry. *Meas. Tech.*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 1311–1315.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0126-0>
- [7] Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Leonov A.A. Imitation modeling of production processes by using the planned and situational logic of the workplaces reservation. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2021, no. 1, pp. 3–10 (in Russ.).
- [8] Grigoriev S.N., Kozochkin M.P., Sabirov F.S., et al. Diagnostic systems as basis for technological improvement. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 599–604.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.05.006>

- [9] Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Umnov P.I., et al. Imitation modeling of production processes by using the planned and situational logic of the workplaces reservation. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2021, vol. 75, no. 7, pp. 291–295 (in Russ.).
- [10] Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E., et al. PlantTwin simulation system as a tool for verifying production plans and supporting decision-making to improve the efficiency of machine-building industries. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 329, art. 03075. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903075>
- [11] Arkhangel'skiy V.E. [Production planning system requirements in the scope of "Industriya 4.0" conception]. *VII Mezhdunar. forum "Informatsionnye tekhnologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii"* [VII Int. Forum "Information Technologies on Duty of Russian Defence Industry Complex"]. 2018 (in Russ.). Available at: <http://xn--hlaelen.xn--plai/wp-content/uploads/2018/05/Arhangel'skiy.pdf> (accessed: 18.02.2020).
- [12] Grigoriev S.N., Martinov G.M. An ARM-based multi-channel CNC solution for multi-tasking turning and milling machines. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 525–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036>
- [13] Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Arkhangel'skiy V.E., et al. [Management models of production systems of machine-building enterprises based on the development and use of their digital counterparts]. *Modelirovanie nelineynykh protsessov i system. Mater. 5 Mezhdunar. konf.* [Modeling of Nonlinear Processes and Systems. Proc. 5 Int. Conf.]. Moscow, Yanus-K Publ., 2021, pp. 171–176 (in Russ.).
- [14] Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., et al. Integration of different computer-aided systems in product designing and process planning on digital manufacturing. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 476–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.247>
- [15] Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., et al. Competitive-resource information model of the machine building manufacturing system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012008>
- [16] Sistema imitatsionnogo modelirovaniya AnyLogic [AnyLogic imitation modeling system] *anylogic.ru: website* (in Russ.). Available at: <https://anylogic.ru> (accessed: 18.02.2020).
- [17] Sistema imitatsionnogo modelirovaniya PlantTwin [PlantTwin imitation modeling system] *plant-twin.com: website* (in Russ.). Available at: <https://plant-twin.com> (accessed: 18.02.2020).
- [18] Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E., et al. PlantTwin simulation system as a tool for verifying production plans and supporting the decision-making to improve production effectiveness. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 3, pp. 80–85 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-3-80-85>
- [19] Malykhanov A.A., Chernenko V.E. [From simulation models to digital twins: analysis of industrial projects experience]. *9 Vseros. nauch.-prakt. konf. po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [9 Russ. Sc.-Pract. Conf. on Imi-

tation Modelling with its Application in Science and Industry]. Ekaterinburg, UrSPU Publ., 2019, pp. 37–46 (in Russ.).

[20] Grigoriev S.N., Martinov G.M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized CNC systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 858–863.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031>

[21] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Rakhmievich E.G. A method for assessing manufacturability of products using semantic models in digital manufacturing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 12, pp. 16–25 (in Russ.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-16-25>

Grigoriev S.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of High-Efficiency Machining Technologies, Moscow State University of Technology “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation).

Dolgov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of High-Efficient Machining Technologies, Moscow State University of Technology “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation); Director General, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Nikishechkin P.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computer Control Systems, Moscow State University of Technology “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation); Deputy Director General, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Ivashin S.S. — Lead Engineer, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Dolgov N.V. — Engineer, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., et al. Simulation modeling production processes of various types of machine-building enterprises. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (142), pp. 84–99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>