

Научная статья

УДК 681.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.012>

Дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц

Горькавый М.А.¹ mixkomsa@gmail.com, Кучерова А.И.¹ alina@kucheroval97.ru,Горькавый А.И.¹ gorkavyu_ai51@mail.ru.¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация. Современное производство безэкипажных катеров характеризуется мелкосерийным выпуском деталей и необходимостью оперативной перенастройки технологических процессов, включая процессы нанесения лакокрасочных покрытий. В этих условиях возрастает необходимость в инструментах, позволяющих оценивать эффективность роботизированных технологических решений без вмешательства в реальное производство. Актуальным инструментом является дискретно-событийное моделирование, которое в дальнейшем позволит интегрироваться с цифровыми двойниками оборудования и систем управления для анализа сложных систем.

В статье предложена оригинальная дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц. Модель разработана в программной среде MATLAB SimEvents. В работе выполнена формализация структуры технологического процесса, построение модульной имитационной модели, проверка её адекватности. Предложенный подход позволяет выявлять задержки в серверах технологического процесса, прогнозировать ресурсные затраты, повышать эффективность производственных операций и обеспечивать возможности интеграции с цифровыми двойниками оборудования и систем управления. Результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования ресурсных затрат, оптимизации технологических процессов, расширения инструментов поддержки принятия решений при проектировании и модернизации роботизированных лакокрасочных комплексов в судостроении и авиастроении.

Ключевые слова: автоматизация, роботизированная окраска, имитационная модель, промышленный робот, технологический процесс.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме "Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники".

Для цитирования: Горькавый М.А., Кучерова А.И., Горькавый А.И. Дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 3, С. 99—109. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.012>

Discrete-event model of the automated technological process of applying paint and varnish coatings to large-sized parts of assembly units

Mikhail. A. Gorkavyi¹ mixkomsa@gmail.com, Alina. I. Kucheroval¹ alina@kucheroval97.ruAlexander I. Gorkavyi¹ gorkavyu_ai51@mail.ru.¹Komsomolsk-na-Amure State University, Russian Federation

Abstract. Modern unmanned boat production is characterized by small-scale production of parts and the need for rapid reconfiguration of technological processes, including paint application. Under these conditions, the need for tools that enable the evaluation of the effectiveness of robotic technological solutions without interfering with actual production is growing. Discrete-event modeling is a relevant tool, which will subsequently enable integration with digital twins of equipment and control systems for the analysis of complex systems.

This article proposes an original discrete-event model of an automated technological process for applying paint coatings to large assembly parts. The model was developed in the MATLAB SimEvents software environment. The study formalized the technological process structure, constructed a modular simulation model, and verified its adequacy. The proposed approach allows for the identification of delays in technological process servers, forecasting resource costs, improving the efficiency of production operations, and enabling integration with digital twins of equipment and control systems. The results of the study can be used to predict resource costs, optimize technological processes, and expand decision support tools for the design and modernization of robotic painting systems in shipbuilding and aircraft manufacturing.

Key words: automation, robotic painting, simulation model, industrial robot, technological process.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for 2024-2026 on the topic "Automation of aircraft production using industrial robotics".

For citation: Mikhail A. Gorkavyi, Alina I. Kucheroва, Alexander I. Gorkavyi Discrete-event model of automated technological process of applying paint and varnish coatings to large-sized parts of assembly units, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 3, P. 99—109. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.012

Введение

Современное судостроение, в частности производство безэкипажных катеров (БЭК), характеризуется высокой динамикой развития и быстрым совершенствованием выпускаемой продукции [1]. Это обуславливает необходимость оперативной модернизации технологических процессов (ТП), включая процессы нанесения лакокрасочного покрытия (ЛКП), предназначенные для обеспечения коррозионной стойкости и высоких эксплуатационных характеристик изделий [2, 3]. В этих условиях особое значение приобретает возможность быстрой перенастройки ТП, что требует применения универсальных и гибких решений.

Одним из перспективных направлений автоматизации является проектирование универсальных технологических комплексов на базе робототехнических систем. Их использование обеспечивает возможность обработки широкой номенклатуры продукции, а при наличии средств автоматического детектирования изделий внутри ТП — выполнение операций над разнородными типами детали сборочных единиц (ДСЕ) в рамках одной загрузки. Это особенно важно при производстве БЭК, где состав ДСЕ может существенно варьироваться.

ТП нанесения ЛКП на ДСЕ корпусов БЭК включает несколько последовательных стадий. На этапе подготовки проводится внешний осмотр и контроль комплектности поступающих ДСЕ, после чего они закрепляются на оснастке, которая захватывается манипулятором и транспортируется на участок предварительной подготовки, где проводятся обезжиривание ДСЕ и изолирование её зон, не подлежащих окраске. Далее следует основной покрасочно-сушильный цикл, состоящий из нанесения ЛКМ, транспортировки ДСЕ в сушильную камеру и возвращения в покрасочную камеру для нанесения следующего слоя с обязательным промежуточным контролем качества. Завершающий этап предполагает снятие оснастки с манипулятора, демонтаж изделий с оснастки, удаление изоляционных материалов, проведение окончательного контроля качества покрытия, нанесение маркировки и клеймение, а также оформление сопроводительной документации изделий и передачу готовой продукции в дальнейшие цеха.

Для функционирования роботизированных покрасочных комплексов в автоматическом режиме должны быть решены следующие задачи автоматизации: логистика транспортировки, сортировки и хранения; идентификация деталей; автоматический синтез управляющих программ роботов; контроль качества; маршрутизация материальных и информационных потоков; а также коммуникация с локальными системами управления (ЛСУ) — системой управления манипуляторами, контурами безопасности, роботами и вышестоящими уровнями автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и автоматизированных систем управления промышленными производствами (АСУПП).

Для оптимизации роботизированных ТП в условиях ограниченных вычислительных и временных ресурсов традиционно применяются упрощённые математические модели, разрабатываемые инженерами-практиками и исследователями в области дискретно-событийного моделирования и цифровых производственных систем [4]. Это может приводить к нестабильному функционированию роботизированных систем и, как следствие, к снижению общей эффективности их внедрения [5, 6]. Но использование сложных моделей может также привести к снижению эффективности эксплуатации этих моделей. Поэтому является целесообразным разделить модель на модули, где к каждому модулю будет уделяться отдельное внимание при проектировании.

Бесшовная интеграция модулей возможна только при наличии центральной модели, которая объединяет локальные автоматизированные системы управления (АСУ) и отдельные модули в единую архитектуру системы управления. Такая модель представляет собой элемент цифрового двойника (Digital Twin), включающий компоненты имитации исполнения технологических операций, интеграции аппаратных и программных средств, а также маршрутизации информационных и материальных потоков. Использование цифрового двойника позволяет инициировать процессы управления, диагностики, мониторинга и прогнозирования, что значительно повышает эффективность ТП.

Таким образом целью исследования является исследование дискретно-событийной модели (ДСМ) автоматизированного ТП нанесения ЛКП на крупногабаритные ДСЕ БЭК, позволяющей в дальнейшем интегрироваться с цифровыми двойниками оборудования и систем управления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- формализация структуры ТП нанесения ЛКП с выделением ключевых этапов подготовки, окраски, сушки и финального контроля;
- разработка дискретно-событийной модели, обеспечивающей возможность анализа различных сценариев работы;
- проверка адекватности имитационной модели [7] путём сравнения результатов моделирования с реальными данными ТП;
- визуализация результатов моделирования системы управления (рабочая зона роботизированной покраски в цифровом двойнике).

Методология

Объектом исследования является автоматизированный ТП нанесения ЛКП на крупногабаритные ДСЕ БЭК. В рамках работы рассматриваются операции подготовки, окраски, сушки и финального контроля ДСЕ, а также взаимодействие технологических подпроцессов, обеспечивающих выполнение этих операций в автоматизированном режиме. Границы исследования определены рамками ТП покраски и сушки ДСЕ: в модель не включаются процессы

изготовления корпуса, механической обработки и сборки, но учитываются логистические операции транспортировки и контроль качества.

Для построения модели использовались такие методы как:

- теоретическое исследование, заключающееся в аналитическом обзоре современных практик в области роботизированной покраски и цифровых двойников;
- эмпирическое исследование - консультации с производственными специалистами по участкам окраски и логистике производства;
- документальный анализ, то есть анализ технической документации оборудования (робот ABB IRB 580, покрасочная камера PKPF MID, сушильная камера типа РКК, транспортные системы).

В модели были использован комплекс структур данных в том числе: геометрические параметры ДСЕ, технические характеристики оборудования (робота, системы подачи краски), а также организационные параметры ТП. Данные имеют оценочный и расчетный характер и варьируются в допустимых пределах одной смены, что позволяет проводить моделирование с учётом небольших погрешностей и стохастических факторов.

На практике, ввиду ограничений вычислительных ресурсов и энергопотребления, проведение полного анализа всех процессов в реальном времени является нецелесообразным. В этой связи актуальной становится необходимость применения более экономичных и эффективных методов моделирования, к числу которых относится дискретно-событийное моделирование. Этот метод позволяет абстрагировать сложные системы до совокупности ключевых событий и переходов, что обеспечивает существенное сокращение вычислительных затрат при сохранении адекватности моделирования.

Разработка ДСМ выполнялась в среде MATLAB SimEvents, так как данный инструмент имеет высокую степень визуализации, большую гибкость

при построении сложных систем и возможностью использовать вычислительный инструментарий MATLAB. В качестве средств визуализации рабочего пространства роботизированной покраски использовалось ПО RobotStudio [8], которое позволяет проектировать роботизированный комплекс (представлять анимацию имитации ТП) и использовать виртуальный контроллер для дальнейшего моделирования ТП. Также программа имеет богатую библиотеку робототехнического оборудования, которая постоянно совершенствуется.

Адекватность модели проверялась путем варьирования ее параметров и сравнения полученных интегральных показателей по модели с технологическими параметрами, реализуемого на предприятии процесса. Также верификация проводилась путем сравнения результатов моделирования с расчетными значениями по технической документации.

Для подтверждения адекватности модели использовалось сопоставление с существующими аналогичными ДСМ производственных линий, представленными в научных публикациях [9] и на реальном производстве.

Результаты

Результаты исследования современных практик и примеров проектирования, внедрения и реализации ТП на базе промышленных роботов совместно с критическим анализом научных работ в области моделирования ТП роботизированной покраски, послужили основой для предлагаемой авторами оригинальной имитационной модели расширенного роботизированного ТП нанесения ЛКП на ДСЕ БЭК.

Для удобства восприятия ДСМ необходимо представить визуализацию рабочего пространства роботизированного ТП. На рис. 1 представлена 3D-визуализация рабочей среды покрасочной камеры.

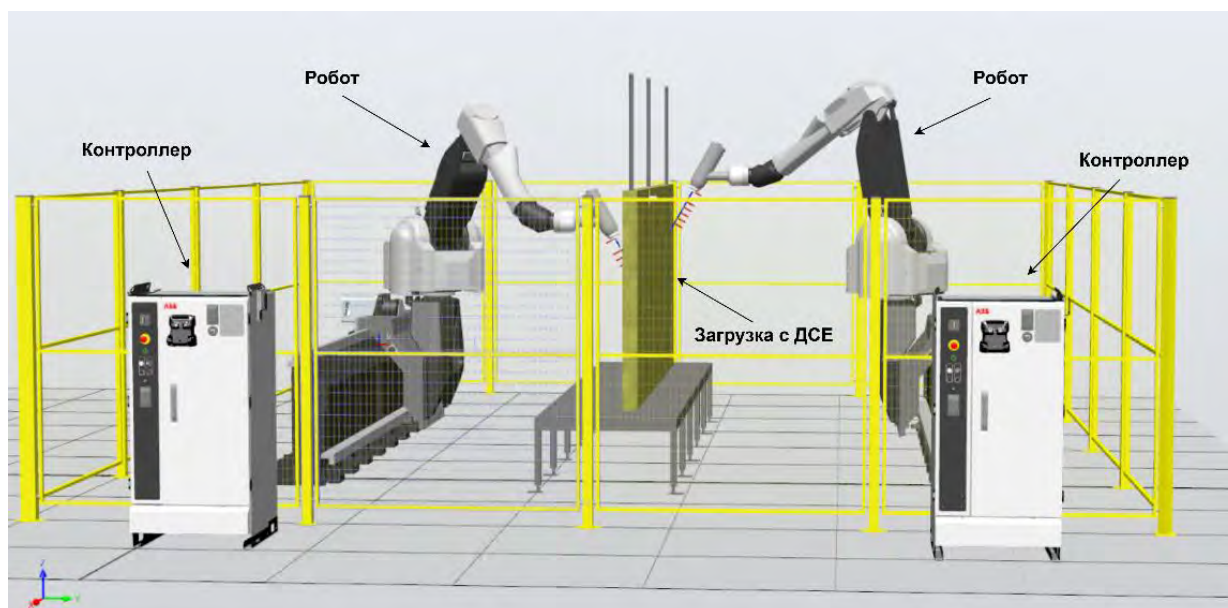


Рис. 1. 3D-визуализация рабочей среды цифрового двойника ТП

На рис. 1 представлен ТП нанесения ЛКП на крупногабаритные ДСЕ, где в камере покраски роботы производителя АВВ, установленные на линейной направляющей окрашивают ДСЕ с двух сторон. За пределами покрасочной зоны находятся контроллеры.

Бесшовная интеграция модели, состоящая из четырех модулей, позволяет специализированному персоналу и операторам, отслеживать и моделировать процессы, события и режимы с учетом взаимосвязей иерархической системы управления.

Структурная схема ДСМ нанесения ЛКМ на ДСЕ БЭК представлена на рис. 2.

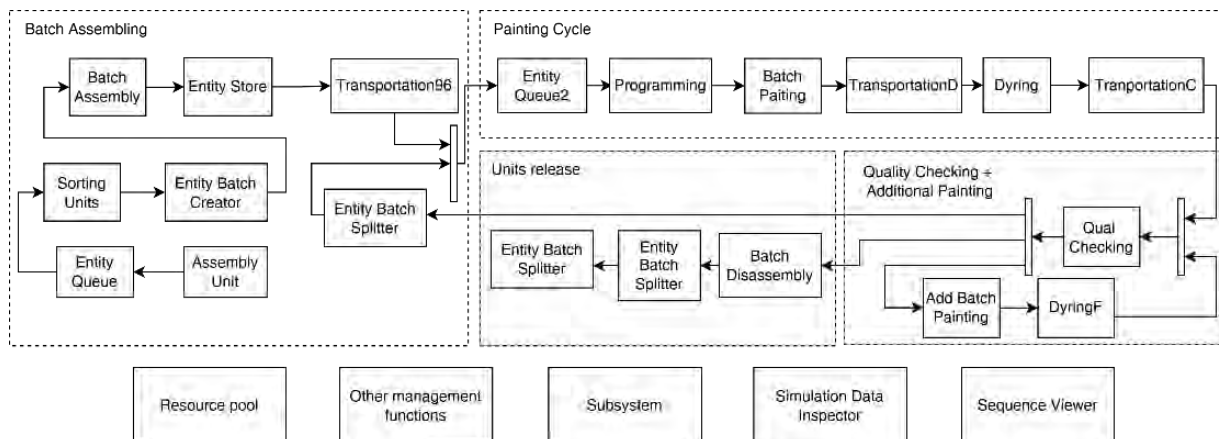


Рис. 2. Контекстный уровень структурной схемы ДСМ

Из основных структурных единиц ДСМ содержит:

- четыре модели операционных зон – модули «BatchAssembling», «Painting Cycle», «Quality Checking + Additional Painting», «Units release»;
- пул ресурсов с интерфейсов ввода/вывода параметров (Resource pool);
- группу внешних функций управления, контроля и настройки элементов модели (Other management functions);
- интерфейс визуализации базовых параметров (Subsystem);
- интерфейс мониторинга действий и состояния (Simulation Data Inspector);
- база данных параметров ТП (Sequence Viewer).

К особенностям структуры предложенной ДСМ можно отнести разграничение ТП на операционные зоны – представленные модулями:

«BatchAssembling» представляет собой процесс подготовки ДСЕ к покраске. Модуль сортировки и формирования загрузки ДСЕ. В этом модуле осуществляется контроль поступающих элементов, их распределение и группировка в загрузку, что позволяет обеспечить равномерную работу оборудования на последующих стадиях.

«Painting Cycle» - этап покраски и сушки ДСЕ. Модуль включает блоки программирования траекторий движения роботов, операции покраски, транспортировки ДСЕ в сушильные камеры и процесс сушки. Таким образом, в ней объединены все операции основного производственного цикла.

«Quality Cheking + Additional Painting» - модуль контроля качества покрытия и маршрутизации

изделий с дефектами. Если результаты проверки выявляют отклонения, ДСЕ подвергается исправлению дефектов и далее направляется на дополнительное окрашивание и повторную сушку, либо если ДСЕ не имеет дефектов, но толщина готового изделия меньше назначенной нормы, то ДСЕ отправляется в покрасочную камеру на этап «Painting Cycle». Такой механизм обеспечивает возможность обработки неоднородных ДСЕ в загрузке и повышает гибкость ТП.

«Units release» - представляет собой модуль, отвечающий за выпуск готовой продукции. В рамках данного модуля осуществляется демонтаж ДСЕ с манипулятора, после чего производится их снятие с оснастки. Далее выполняется снятие изоляционных материалов и осуществляется итоговый контроль качества, по завершении которого ДСЕ подвергаются маркировке и клеймению. Завершающим этапом является закрытие сопроводительной документации изделия, после чего ДСЕ передается в последующие производственные цеха для дальнейшего использования или обработки.

Разделение структурной схемы ТП на отдельные модули способствует повышению их наглядности, упрощает аналитические процедуры и ускоряет интеграцию модели с цифровыми двойниками локальных систем управления (ЛСУ). Данный подход обеспечивает более эффективное взаимодействие между различными уровнями автоматизации и управления, что является ключевым фактором в достижении синергетического эффекта и оптимизации производственных процессов.

На рис. 3 представлена имитационная ДСМ.

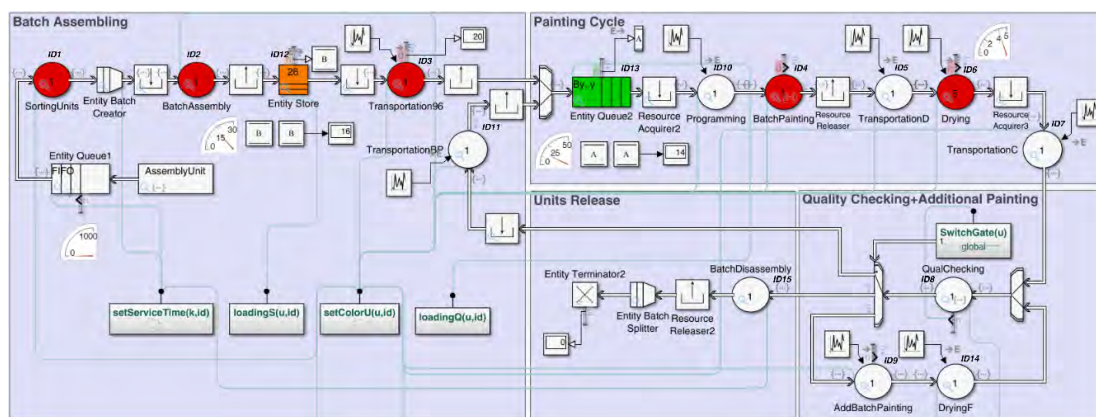


Рис. 3. Имитационная ДСМ нанесения ЛКП на ДСЕ БЭК

Модуль «BatchAssembling» - реализует функции сортировки и формирования загрузки ДСЕ, поступающих на покрасочный участок. Она моделирует процессы приёмки, распределения и подготовки ДСЕ к передаче в модуль покраски.

Модуль имеет два режима работы: стандартный режим – последовательная обработка поступающих ДСЕ; аварийный режим – перенаправление ДСЕ в очередь при задержке ресурса «batch».

Блоки модулей и их функции:

- Assembly Unit (Entity Generation) - генератор сущностей (ДСЕ) - блок, имитирующий поставку ДСЕ в цех. В блоке формируется n-ое количество типов ДСЕ (формируются по степени кривизны и по размеру ДСЕ).

- Entity Queue1 – очередь поступающих ДСЕ, генерирующая ДСЕ – склад. Этот блок вызывает функцию setServiceTime, которая устанавливает время обработки ДСЕ для Sorting Units.

- Sorting Units (Entity server) – сервер сортировки, распределяющий ДСЕ. В блоке сортируются и подготавливаются ДСЕ для дальнейшей сборки в загрузку. Время обработки зависит от параметров ДСЕ (площадь и степень кривизны).

- Entity Batch Creation – вызывает функцию setServiceTime.

- Batch Assembly – формирование загрузки из нескольких ДСЕ одного или разных типов. В блоке ДСЕ образуют загрузку. Время обработки зависит от площади ДСЕ в загрузке.

- Entity store – хранит собранные загрузки для дальнейшей транспортировки.

- TransportationP / TransportationBP – модули транспортировки загрузки к следующему этапу или в обходные маршруты. В блоках транспортируются загрузки из модуля первичного сбора или из модуля проверки качества и исправления дефектов.

- Resource Acquirer – блок, который занимает ресурсы в работу производственной линии. В этом модуле такие ресурсы как оснастка (crossbar) и оператор (operator) занимают после формирования ДСЕ в загрузку.

- Resource Releaser – блок, который высвобождает ресурсы. В данном модуле высвобождается оператор после того, как распределил ДСЕ на оснастку и манипулятор.

Сигналы поступают от блока uniform random number (URN) формируя поток ДСЕ и количество времени.

Состояние данного модуля регистрируется и отображается в интерфейсе мониторинга (загрузка серверов, количество загрузок в очереди, среднее время ожидания).

Модуль поддерживает динамическое формирование загрузки: количество элементов в загрузке может изменяться в зависимости от поступающего потока ДСЕ.

Встроенные функции позволяют варьировать время обработки в зависимости от характеристик ДСЕ.

Наличие двух серверов, в которых осуществляется транспортировка (TransportationP и TransportationBP) — загрузка может быть направлена либо по основному, либо по пути исправления дефектов.

Очереди и сортировочные узлы позволяют исследовать влияние вариаций входного потока на загрузку оборудования.

Таким образом, модуль Batch Assembling моделирует начальный этап ТП и задаёт основу для анализа эффективности всей производственной линии.

Модуль «Painting Cycle» моделирует полный цикл нанесения ЛКП загрузки ДСЕ. Модуль объединяет процессы программирования роботов, выполнение покраски, транспортировку в сушильные камеры, сушку и передачу обработанных ДСЕ в загрузку в зону контроля качества.

Состав и функции блоков:

- Entity Queue2 — буферная очередь загрузок. Управляется функциями: loadingQ, которая отслеживает загрузку и setColorU(u,id), которая динамически изменяет цветовую индикацию (зелёный/оранжевый/красный) в зависимости от степени заполнения. Это позволяет контролировать состояние загрузки сервера. Выход из очереди осуществляется по приоритетности количества слоев.

- Resource Acquirer2 — занимает ресурс покрасочной установки (рабочее место с роботом).

- Programming — сервер создания управляющих программ. Время выполнения задаётся функцией setServiceTime(u,id). Блок реализует процесс синтеза управляющих программ для окрашивания ДСЕ в рамках загрузки. Блок рассчитывает время для блока BatchPainting.

- BatchPainting — сервер реализации покраски ДСЕ в загрузке. Время выполнения рассчитывается

функцией `setServiceTime(u,id)` и зависит от площади поверхности, степени кривизны ДСЕ и количества ДСЕ в загрузке.

- Resource Releaser — освобождение ресурса покрасочной камеры.

- TransportationD — транспортировка ДСЕ в загрузку в сушильную камеру, длительность моделируется функцией `setServiceTime(u, id)`.

- Drying — блок реализует процесс сушки ДСЕ, подпроцесс может обслуживать одновременно 2 загрузки. Время выдержки задаётся функцией `setServiceTime(u,id)`.

- Resource Acquirer3 — занимает ресурс межоперационной транспортировки для вывода ДСЕ в загрузку из сушильной камеры (манипулятор).

- TransportationC — транспортировка загрузки в зону контроля качества, время определяется функцией `setServiceTime(u, id)`.

Разделение подпроцессов программирование и окраска позволяет моделировать эффект перенастройки при переходе к новым изделиям.

Использование внешних функций для задания времени обслуживания обеспечивает гибкость сценарного анализа.

Модуль Quality Checking + Additional Painting представляет контроль качества нанесённого покрытия и маршрутизацию загрузки в зависимости от результата проверки: выпуск годных изделий, доработка или исправление дефектов.

Состав и функции блоков:

- QualChecking — сервер контроля. Время контроля задаётся функцией `setServiceTime(u,id)`. В блоке на этапе «service complete action» заложена имитация дефектов 5 % ДСЕ.

- AddBatchPainting — сервер устранения дефектов. В блоке происходят дополнительные манипуляции для устранения дефектов изделия. Время обработки задаётся функцией `setServiceTime(u,id)`.

- DryingF — сервер сушки после устранения дефекта. Время обработки рассчитывается функцией `setServiceTime(u,id)`. После этого загрузка повторно поступает на проверку качества «QualChecking», где измеряется толщина ЛКП ДСЕ.

Логика работы модуля учитывает различие между «доработкой годных ДСЕ» (флаг 1) и «исправлением дефектов» (флаг 3), что позволяет вести статистику причин возврата.

Замкнутый цикл (AddBatchPainting – DryingF – QualChecking) отражает реальный ТП, где изделия могут несколько раз возвращаться на доработку.

Использование глобального управляющего сигнала в SwitchGate обеспечивает возможность гибкой настройки сценариев качества и испытаний.

Модуль «Units Release» является завершающим модулем, в которой происходит демонтаж загрузки с манипулятора, затем с оснастки, что подразумевает высвобождение ресурсов и выпуск готовых изделий из системы.

Состав и функции блоков:

- BatchDisassembly — сервер итоговой приемки ДСЕ. Блок, в котором загрузка снимается с манипулятора и оснастки. Время операции задаётся функцией `setServiceTime(u, id)`.

- Entity Batch Splitter — разделяет загрузку на отдельные единичные ДСЕ.

- Resource Releaser2 — освобождение ресурсов (манипулятора), перемещающего загрузку.

- Entity Terminator2 — завершение жизненного цикла изделий, моделирующее выпуск готовой продукции в последующие цеха.

Отдельный блок высвобождения ресурсов позволяет контролировать реальную загрузку оборудования и исключает ошибки статистики при имитации.

Модуль формирует выходной поток, который может быть использован как источник данных для последующего анализа производительности и качества.

В данном модуле для работы некоторых блоков подключаются функции, описание которых представлено ниже:

- loadingS(u,id) – функция расчёта загрузки ресурсов в зависимости от площади ДСЕ и идентификатора сервиса (блока). Идентификаторы представлены на рис. 3.

- setServiceTime(k,id) – функция задания времени обслуживания (выполнения операции) с учётом характеристик загрузки и идентификаторов блоков.

- setColorU(u,id) – функция индикации.

- loadingQ(u,id) – функция показывает индикацию загрузки очереди.

- SwitchGate(u) — глобально управляемый блок маршрутизации, на вход которого подаётся дискретный управляющий сигнал с тремя состояниями:

- 1) флаг 1 — загрузка направляется в блок «TransportationBP» для нанесения дополнительного слоя покрытия;

- 2) флаг 2 — загрузка признаётся годной и передаётся в модуль «Units Release»;

- 3) флаг 3 — загрузка классифицируется как «дефект, подлежащий исправлению» и отправляется в «AddBatchPainting».

В режиме имитации модель предполагает два варианта задания времени обслуживания в серверах: посредством сигнального порта – в тех случаях, когда время обслуживания статично в определенных пределах и не зависит от типов или параметров обрабатываемых ДСЕ (например, серверы, имитирующие транспортировку на манипуляторе); посредством вызова внешней функции, которая по заданным входным аргументам осуществляет расчет прогнозного времени исполнения операции (например, время окрашивания набора ДСЕ определяется исходя анализа полученной управляющей программы для покрасочного робота – траектории перемещения ЦТИ в пространстве, скоростные режимы и т.п.).

Для расчета времени покраски входными переменными является: площадь ДСЕ; эффективная ширина факела; линейная скорость робота; норма расхода ЛКП; число слоев; плотность ЛКП.

В режиме управления и мониторинга все параметры модели задаются средствами измерения и оценки, регистрирующих значения параметров ТП, сигналы активации и деактивации ТК и ЛСУ, интерпретирующих задачи операторов и АСУТП и т.д.

Механизмы задания времени обслуживания серверов в ДСМ в режиме моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механизмы задания времени обслуживания в серверах

№	Наименование ДС	Формат задания времени обслуживания сервером	Блок / действие или порт задающее $t_{service}$
1	SortingUnits	$t_{service} = setServiceTime(k, id);$ $k = Fun(area, curv);$	Entity Queue1/Exit
2	BatchAssembly	$t_{service} = setServiceTime(k, id);$ $k = Fun(area_{total}, curv_{avg});$	Entity Batch Creator/Exit
3	Transportation96	$t_{service} = loadingS(u, id)$ $t_{service} = URN[5; 7]$	Entity Store/Signal port
4	Programming	$t_{service} = loadingQ(u, id)$ $t_{service} = URN[2; 4]$	EntityQueue2/Signal port
5	BatchPainting	$t_{service} = setServiceTime(k, id);$ $k = Fun(area_{total}, curv_{avg});$	Programming/Exit
6	TransportationD	$t_{service} = URN[2; 2,1]$	Signal port
7	Drying	$t_{service} = URN[100; 110]$	Signal port
8	TransportationC	$t_{service} = URN[2; 2,1]$	Signal port
9	QualChecking	$t_{service} = SwitchGate(u);$ $u = 1; 2; 3$	QualChecking/Service complete
10	DryingF	$t_{service} = URN[10; 10,5]$	Signal port
11	AddBatchPainting	$t_{service} = URN[10; 10,5]$	Signal port
12	BatchDisassembly	$t_{service} = setServiceTime(k, id);$ $k = Fun(area_{total}, curv_{avg});$	BatchDisassembly/Entry
13	TransportationBP	$t_{service} = URN[2; 2,1]$	Signal port

Представленным в табл. 1 обозначениям соответствуют:

ДС – дискретная система;

$t_{service}$ – время обслуживания в сервере;

id – идентификатор блока в модели;

URN – Uniform Random Number.

Классификация и характеристика ресурсов, имеющих в распоряжении комплексов ТП и отражаемых в ДСМ, представлены в табл. 2. В режиме проектирования оптимального ТП с помощью ДСМ, представленные классы ресурсов, в том числе, выступают в качестве переменных заданного обобщенного функционала качества процесса.

Таблица 2

Детализация ограничений и специфика параметров ресурсов для участка покраски

№	Наименование ресурса	Обозначение ресурса	Диапазон доступности ресурса
Материальные потоки: персонал			
1.	Инженер	engineer	[0,1]
2.	Оператор	operator	[0,1]
3.	Контроллер	controller quality	[0,1]
Материальные потоки: оборудование			
4.	Оснастка	crossbar	[0,1]
5.	Робот	robot	[0,2]
6.	Камера покраски	section_paint	[0,1]
Материальные потоки (неограниченные)			
7.	Электрическая энергия	energy	[inf]
8.	ЛКП	mix_paint	[inf]
9.	Растворитель	solvent	[inf]
Информационные потоки			
10.	Цифровой двойник	digitalTwin	[0,1]

Для максимизации эффекта использования предлагаемого решения, в дискретно-событийной модели в рамках концепции Digital Twin обеспечена

поддержка широкого набора функциональных возможностей. Обобщённые функции, наиболее значимые с учетом специфики нанесения ЛКП на ДСЕ БЭК, представлены в списке:

- моделирование влияния вариаций параметров и структур элементов на интегральные показатели оценки эффективности процесса, в том числе в режиме параллельного запуска нескольких копий моделей;

- прогнозирование интегральных показателей, в том числе технико-экономических;

- имитация режимов работ ТП (типовое производство, критические и аварийные режимы);

- мониторинг и визуализация параметров ТП с выводом информации оператору посредством интерфейса;

- инициация запуска и остановки управляющих программ ЛСУ;

ДСМ спроектирована таким образом, чтобы при задействовании ее функционала в задачах проектирования и оптимизации структур и параметров элементов ТП или управления актуальным ТП, осуществлялась поддержка в различных комбинациях и приоритетах группы из трех критериев: производительность ТП или отдельных ТО, ресурсосбережение и безопасность.

Все серверные блоки ДСМ (рис. 2) подключаются к соответствующим цифровым двойникам (моделям реального времени) ЛСУ и АСУТП посредством операционной системы ROS2 и шлюзам управления, получая и отправляя актуальные сигналы, команды и сообщения. На рис. 3 также представлена имитация работы ДСМ, где визуализируется прохождение загрузки ДСЕ через различные модули: формирование, покраска, транспортировка в сушильную камеру, контроль качества и выпуск готовой продукции. Отражены динамические очереди, загрузка ресурсов (роботов, камер, манипуляторов) и маршрутизация ДСЕ в загрузках в зависимости от качества покрытия.

Модель способна строить многомерные связи — то есть показывать, как общие результаты работы

(например, общая производительность) зависят сразу от нескольких ключевых факторов (параметров). Это дает системе управления информацию для выбора оптимальных решений.

На рис. 4 и 5 представлены графики, которые отражают показатели количества ДСЕ, выпущенных из серверов «BatchPainting», «EntityTerminator», «Transportation96» «Entity Output Switch».

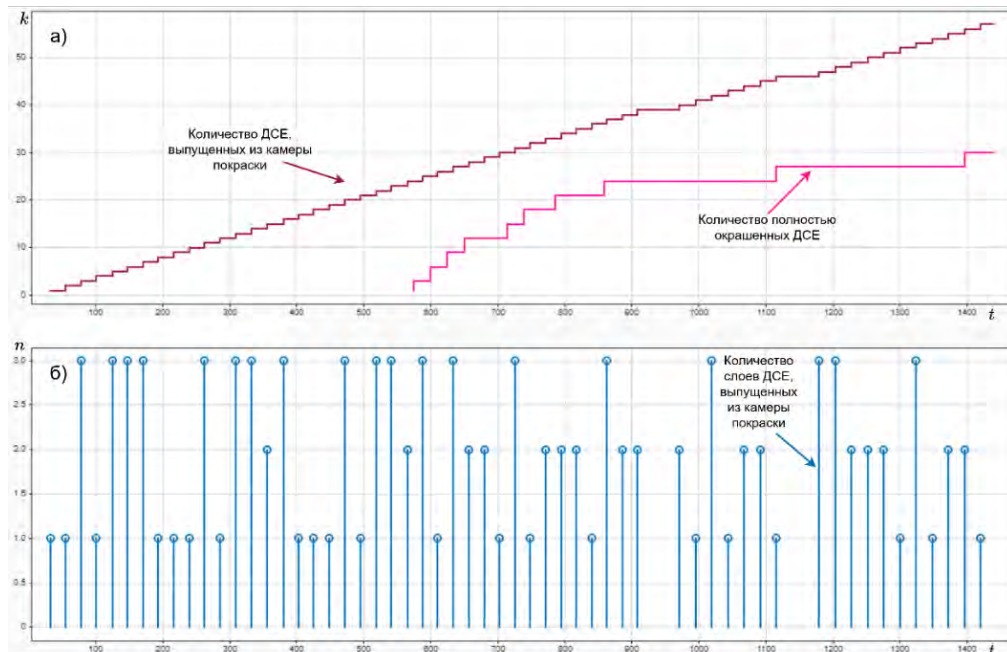


Рис. 4. График показателей: а) количество ДСЕ при итоговом выпуске и количество ДСЕ, поступивших в камеру покраски; б) загрузка ДСЕ с n -ым количеством слоев, выпущенных из камеры покраски.

На рис. 4 показано, как количество ДСЕ, произведенных за две смены, зависит от двух параметров в технической части системы:

- от среднего времени обслуживания в сервере (оборудовании, обрабатывающем ДСЕ).

- от общей продолжительности такого обслуживания.

Эти элементы можно автоматизировать, чтобы повысить общую эффективность (например, ускорить процесс и снизить затраты).

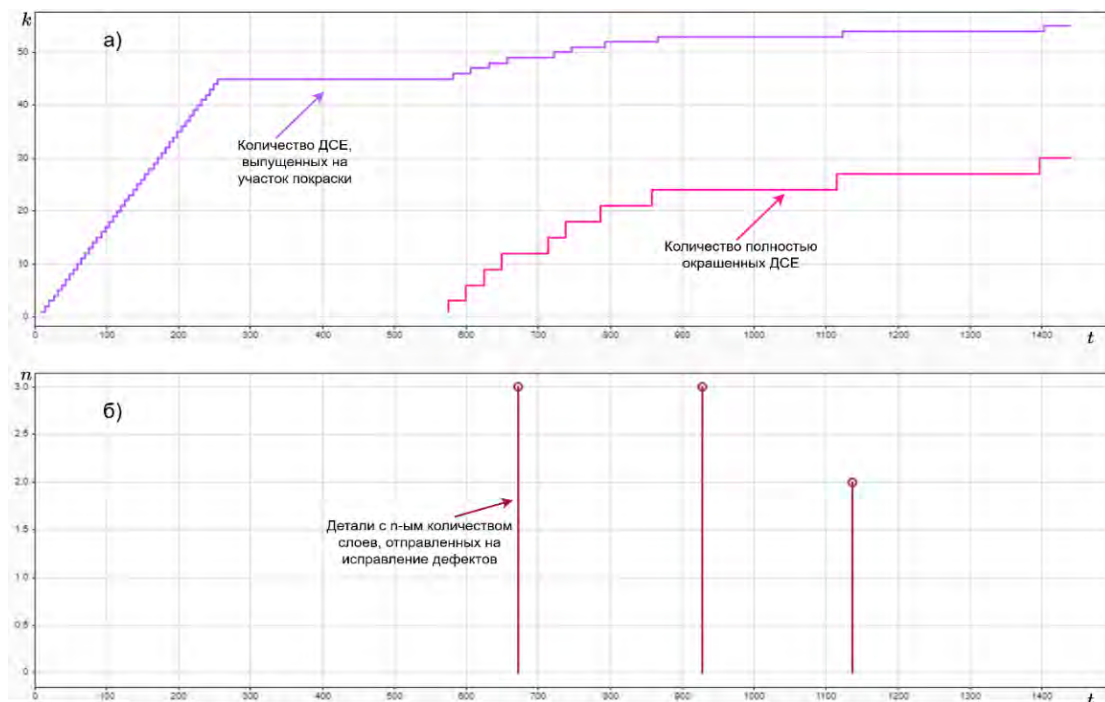


Рис. 5. График показателей: а) количество ДСЕ, поступивших на участок и количество выпущенных ДСЕ с участка; б) количество ДСЕ, поступивших на исправление дефектов.

Исходя из графиков на рис. 4 и 5 можно увидеть задержки очередей и их причину. Например, на рис.

5 в сервере итогового выпуска на 650 минуте, 870 минуте и на 1120 минуте видно, что в этот период

времени сервер не выпускал загрузку ДСЕ, причиной этого стало возникновение дефектов и отправку загрузки на исправление дефектов и повторную покраску, следовательно выпуск загрузки задержался, что показал график на рис. 5а.

Построенная ДСМ может формировать n -мерные зависимости, то есть зависимость интегральных показателей от нескольких значимых переменных, что может представить для системы управления информацию при неоднозначном выборе, в частности, на рис. 6 представлен график визуализации зависимости ключевых показателей количество производительности за 2 смены от времени обслуживания в сервере покраски ДСЕ средней продолжительности времени обслуживания в сервере и контроля после покраски ДСЕ, то есть в тех подпроцессах, которые могут быть автоматизированы (повышена эффективность автоматизации).

В условиях функционирования камеры покраски в течение 40 минут и проведения итогового контроля в течение 25 минут, производительность процесса составляет 22 детали в рамках двух рабочих смен (24 часа), что указывает обозначение «i» на графике.

При увеличении времени работы камеры покраски до 60 минут и времени контроля до 30 минут, производительность процесса за две смены снижается до 12 деталей, что показывает обозначение «o» на рисунке.

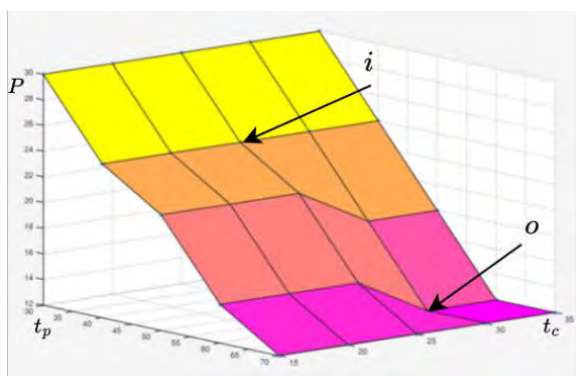


Рис. 6. Трехмерный график зависимости производительности участка от времени производственных серверов

Исходя из графика на рис. 6 видно, что зависимость производительности ТП (P) от времени работы сервера контроля (t_c) и сервера покраски (t_p) не линейна [10], что также закладывает определенный потенциал оптимизации при принятии решений об обеспечении требуемого уровня производительности, например, при планировании можно точнее настроить систему, чтобы достичь нужного уровня производительности без лишних усилий или ресурсов. Например, небольшое изменение времени обслуживания может существенно увеличить выпуск продукции.

Таким образом, в ходе исследования были получены результаты:

- 1) Выполнена формализация структуры автоматизированного ТП нанесения ЛКП на крупногабаритные ДСЕ.
- 2) Разработана модульная ДСМ в среде MATLAB SimEvents, обеспечивающая возможность анализа ТП.
- 3) Проведена проверка адекватности модели, подтвердившая её соответствие реальным условиям функционирования ТП.
- 4) Интеграция с системой визуализации RobotStudio позволила повысить наглядность и удобство анализа результатов моделирования.
- 5) Установлено, что применение предложенной модели способствует выявлению очередей в серверах, оценке ресурсных затрат и оптимизации загрузки оборудования.

Заключение

В ходе проведенных исследований была разработана и исследована ДСМ автоматизированного ТП нанесения ЛКП на крупногабаритные ДСЕ. Разработанная модель формализует ключевые стадии ТП, включая подготовку, покраску, сушку и контроль качества, что обеспечивает возможность комплексного анализа ТП.

Проведенная формализация структуры ТП и построение модульной имитационной модели позволили выполнить оценку адекватности предложенного решения и продемонстрировать его применимость для анализа реальных ТП.

Результаты моделирования подтвердили возможность использования предложенного подхода для выявления очередей, прогнозирования ресурсных затрат и оптимизации параметров функционирования оборудования. Практическая значимость исследования заключается в расширении инструментов поддержки принятия решений при проектировании и модернизации роботизированных покрасочных комплексов в судостроении и авиастроении.

Научная новизна работы определяется интеграцией дискретно-событийного моделирования с технологиями цифрового двойника, что обеспечивает расширенные возможности по анализу динамики технологических процессов и созданию цифровых реплик производственных систем.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели за счёт включения адаптивных алгоритмов управления, интеграции с агентными моделями и разработкой комплексных цифровых двойников ТП. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации технологических процессов в судостроении и авиастроении.

Литература

1. Трухинова О.Л. Новые приоритеты в индустрии судостроения. В кн.: Социально-экономическое развитие России: проблемы, тенденции, перспективы: сборник научных статей участников XXIII Международной научно-практической конференции, Курск, 15 мая 2024 года. Курск, изд. «Университетская книга», 2024, с. 407–410.

2. Анцев В.Ю., Витчук Н.А., Витчук П.В., Петренко Е.А. Повышение качества процесса нанесения лакокрасочного покрытия на автомобили. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2020, т. 16, № 5, с. 119–123. DOI 10.36622/VSTU.2020.16.5.018.
3. Искандаров М.Х., Пчельников А.В., Пичугин А.П. Нанотехнологические принципы повышения качества подготовки металлических поверхностей к окрашиванию. В кн.: Качество. Технологии. Инновации: материалы VIII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 12–14 февраля 2025 года. Новосибирск, изд. «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», 2025, с. 9–14.
4. Kampa A., Golda G., Paprocka I. Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. Computers, 2017, т. 6, № 1, 10. DOI 10.3390/computers6010010.
5. Mawson V.J., Hughes B.R. The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems. Journal of Manufacturing Systems, 2019, т. 51, с. 95–105.
6. Кузнецова Т.А., Мещеряков В.А. Сравнение программных средств имитационного моделирования систем массового обслуживания. В кн.: Потенциал российской экономики и инновационные пути его реализации: материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Омск, 14 апреля 2015 года. Омск, «Региональный общественный фонд «Фонд региональной стратегии развития», 2015, с. 187–192.
7. Черный С.П., Савельев Д.О., Сбитнев Н.Р., Саяпина П.О. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров. Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 2024, № 1(73), с. 4–10.
8. Khalilov E.O.O. Development of architecture of the tool of automated modeling of the imitation model of a flexible manufacturing system. Проблемы современной науки и образования, 2019, № 10(143), с. 31–36.
9. Сабиров Р.Р. Разработка дискретно-событийной имитационной модели на примере производственного процесса. Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2023, № 2(35), с. 28–35.
10. Гудим А.С., Савельев Д.О., Плохотнюк В.В. Интеллектуальная система компенсации нелинейностей систем автоматического управления. Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 2025, № 1(81), с. 4–11.

References

1. Trukhinova O.L. Novye priority v industrii sudostroeniya [New priorities in the shipbuilding industry]. V sbornike: Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Rossii: problemy, tendentsii, perspektivy: sbornik nauchnykh statej uchastnikov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kursk, 15 maya 2024 goda. Kursk, izd. "Universitetskaya kniga", 2024, 407–410 s.
2. Antsev V.Yu., Vitshuk N.A., Vitshuk P.V., Petrenko E.A. Povyshenie kachestva protsessa naneneniya lakokrasochnogo pokrytiya na avtomobili [Improving the quality of automotive painting processes]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2020, 16(5), 119–123 s.
3. Iskandarov M.Kh., Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P. Nanotekhnologicheskie printsipy povysheniya kachestva podgotovki metallicheskih poverkhnostej k okrashivaniyu [Nanotechnological principles for improving the preparation of metal surfaces for painting]. V sbornike: Kachestvo. Tekhnologii. Innovatsii: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferentsii, Novosibirsk, 12–14 fevralya 2025 goda. Novosibirsk, izd. "Novosibirskij gosudarstvennyj arkhitektarno-stroitel'nyj universitet", 2025, 9–14 s.
4. Cherny S.P., Savel'ev D.O., Sbitnev N.R., Sayapina P.O. Osobennosti modelirovaniya sistem upravleniya slozhnymi ob"ektami, trebuyushchimi ucheta geometricheskikh parametrov [Features of modeling control systems of complex objects requiring consideration of geometric parameters]. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2024, no. 1(73), 4–10 s.
5. Kampa A., Golda G., Paprocka I. Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. Computers, 2017, 6(1), 10. <https://doi.org/10.3390/computers6010010>.
6. Mawson V.J., Hughes B.R. The development of modelling tools to improve energy efficiency in manufacturing processes and systems. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.008>.
7. Kuznetsova T.A., Meshcheryakov V.A. Sravnenie programmnykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya sistem massovogo obsluzhivaniya [Comparison of simulation software for queuing systems]. V sbornike: Potentsial rossijskoj ekonomiki i innovatsionnye puti ego realizatsii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Omsk, 14 aprelya 2015 goda. Omsk, izd. "Regional'nyj obshchestvennyj fond 'Fond regional'noj strategii razvitiya'", 2015, 187–192 s.
8. Khalilov E.O.O. Development of architecture of the tool of automated modeling of the imitation model of a flexible manufacturing system. Problemy sovremennoj nauki i obrazovaniya, 2019, no. 10(143), 31–36.
9. Sabirov R.R. Razrabotka diskretno-sobytiynoj imitatsionnoj modeli na primere proizvodstvennogo protsesssa [Development of a discrete-event simulation model on the example of a production process]. Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona, 2023, no. 2(35), 28–35 s.
10. Gudim A.S., Savel'ev D.O., Plokhotnyuk V.V. Intel'ektual'naya sistema kompensatsii nelinejnostej sistem avtomaticheskogo upravleniya [Intelligent system for compensating nonlinearities of automatic control systems]. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2025, no. 1(81), 4–11 s.

Конфликт интересов
Не указан.

Conflict of Interest
None declared.

Рецензия
Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review
All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Горькавый Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, e-mail: mixkomsa@gmail.com

Mikhail A. Gorkavyu, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department "Industrial Electronics and Innovative Technologies", Komsomolsk-na-Amure State University, Lenin, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation, e-mail: mixkomsa@gmail.com

Кучерова Алина Игоревна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, e-mail: alina@kucherova97.ru

Alina I. Kucherova, graduate student, Komsomolsk-na-Amure State University, Lenin, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation, e-mail: alina@kucherova97.ru

Горькавый Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, e-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru

Alexander I. Gorkavyu, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department "Electric Drive and Automation of Industrial Installations", Komsomolsk-na-Amure State University, Lenin, 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation; e-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2025.