

направления скорости значительно меньше диаметра сечения шнура. Поэтому при столкновении со стенкой электрический ток упадет на порядки еще до рекомбинации ионов в шнуре за счет столкновения с холодной стенкой.

Таким образом, будет получено изменение магнитного момента контура порядка $10^4 \text{ А} \times \text{м}^2$ за времена порядка $10^{-9} - 10^{-10}$ секунд. Оценки на основе этих предположений дают интегральную мощность импульса РЧЭМИ около 5 ГВт.

Необходимо отдельно отметить, что организация электропитания описанного источника РЧЭМИ возможна не только особым видом ядерного генератора. Необходимую электрическую мощность можно «выбить» взрывом обычного ВВ или аэрозоли

во взрывной камере с блоками пьезоэлектрика.

Список литературы

1. Прищепенко, А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. М.; БИНОМ, 2008.
2. Пьезоэлектрики. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. – М.; Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.
3. Патент №2694362 РФ G21H 1/02. Способ преобразования ядерной энергии (энергии радиоактивного распада и/или деления атомных ядер и/или энергии термоядерных нейтронов) в электрическую энергию и устройство для его осуществления/ Стельмахович Е.М., Криницкая С.Н., Крюков В.В., 2019.

УДК 004.94

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В ПРОГРАММЕ ANYLOGIC

М.В. Басова¹

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт материалов», 191014, Санкт-Петербург, ул. Парадная, 8, e-mail: info@cniim.com

В статье рассмотрен вопрос применения имитационного моделирования технологических потоков. Описывается алгоритм построения диаграммы процесса для дискретно-событийного моделирования в программе AnyLogic автоматизированного участка механической обработки деталей типа тел вращения.

Ключевые слова: моделирование, механическая обработка, тела вращения, роботизированный участок, логистический поток

Производственные системы, как и все системы вообще, определяются на базе двух различных множеств – множества элементов и множества отношений между элементами, образующих в совокупности структуру системы. [1, с. 163]. Технологический процесс в целом, из-за большого количества отдельных элементов (операций,

оборудования, материалов и пр.) и их отношений – является сложной системой. От построения технологического процесса зависят такие параметры как загрузка оборудования, время изготовления одной детали, себестоимость изготовления и так далее [2, с. 230].

¹Басова Мария Владимировна – ведущий инженер АО «ЦНИИМ», магистрант Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, e-mail: e2m5101@voenteh.ru

Результаты, полученные при предварительных расчетах на основе эмпирических формул, могут давать достаточно точные данные для проектирования либо анализа производственного участка, но не позволяют определить его «узкие места», насколько избыточны (недостаточны) производственные мощности с учетом непредвиденных поломок и других ситуаций. Подвергаемые моделированию технологические процессы часто невозможно описать исключительно набором систем уравнений [3, с. 3], поэтому для дальнейшего анализа работы производственного участка рекомендуется применение имитационного моделирования, ввиду отсутствия возможности проведения дорогостоящих натуральных экспериментов.

Имитационное моделирование особенно ценно для организации рациональной системы логистики, подходящей под нужды конкретной выпускаемой продукции, во-вторых – в увеличении эффективного годового фонда времени работы имеющегося оборудования, в-третьих, в снижении себестоимости изготовления продукции за счет оптимизации производственных затрат.

Помимо этого, в настоящее время в большинстве случаев увеличение программы выпуска изделий достигается посредством реорганизации производственных участков, модернизации оборудования, привлечении нового производственного персонала и т.д. В этих условиях применение имитационного моделирования позволяет найти ранее неиспользуемые производственные резервы и тем самым минимизировать затраты на подготовку производства по новой программе выпуска.

Имитационное моделирование для решения сложных инженерных задач управления производственными системами в СССР применялось уже в 80-гг. Например, в качестве примера объекта имитационного моделирования рассчитывались крупные машиностроительные заводы с ассортиментом выпускаемых деталей – 1000 наименований, средним числом производственных заданий в год – 25000, числом рабочих мест и групп технологического оборудования – 200 [1, с. 224-225]. В то время имитационное моделирование в своем развитии еще не

достигло уровня, при котором его следовало бы считать методическим приемом инженеров в их работе в производственной сфере, поэтому, несмотря на свою перспективность, применялось относительно редко и, в основном, при выполнении научных исследований учеными НИИ и вузов [1, с. 161]. Это было отчасти вызвано недостаточно высокой производительностью электронно-вычислительных машин.

В настоящее время имитационное моделирование благодаря росту производительности процессоров компьютеров и улучшению программных технологий находит всё большее развитие в различных областях: в транспортных перевозках, складировании, строительстве, экономике и т.д. [2, с. 230].

Имитационный подход применим и для технологических процессов (как и для производственных процессов в целом), поскольку в них множество параметров, многие зависимости не линейны, система имеет качественно различные состояния (непрерывные процессы прерываются дискретными переходами), обладает вероятностным поведением и обратными связями. Кроме того, имитационный подход незаменим, когда необходимо сопроводить модель анимационной презентацией (симуляцией) [6, с. 9-10].

Несмотря на широту понятия «имитационное моделирование», оно применяется для решения различных задач, в связи с чем выделяются различные его методы. С точки зрения имитационного моделирования, под методом понимается некая основа, используемая для «перевода» системы реальных объектов в мир моделей. Метод предполагает определенный язык, «положения и условия» для разработки модели. На данный момент существуют следующие методы моделирования [5, с. 12]: дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, системная динамика и моделирование динамических систем (последний метод часто отдельно не выделяется и указывается в составе системной динамики) [6 с. 12].

В данной статье описывается алгоритм дискретно-событийного моделирования, как наиболее подходящего для



технологических процессов [4]. В дискретно-событийном моделировании выделяется пассивный объект моделирования — заявка и активный субъект — сервис. В качестве заявки в рассматриваемом случае выступают заготовки. Сервисом служат операции, которые выполняются над заявками — обработка заготовок. Сервисы используют ресурсы для своей работы — необходимое оборудование, а также помещение.

В рамках рассматриваемой задачи рассматривается автоматизированный участок механической обработки ответственных деталей типа тел вращения. Имитационные модели разрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, в данном случае — в программе AnyLogic. Стоит отметить, что дискретно-событийное моделирование применимо не только к производственно-технологическим системам механической обработки, но и к производственно-технологическим системам других областей, например, в металлургии [4].

В соответствии с разработанной технологией, обработка заготовок производится на трех агрегированных операциях. Первая — выполняется на фрезерном станке и занимает 10,265 минут, вторая и третья выполняются на разных токарно-фрезерных станках и занимают 30,411 минут и 29,813

минут, соответственно. На основании предварительного расчета маршрутно-технологического графика загрузки оборудования с учетом коэффициента запаса производственной мощности 0,75, было принято решение, что для первой операции потребуется один фрезерный, для второй и третьей — по два токарно-фрезерных станка. Основные параметры склада — один стеллаж длиной 34 м, шириной 1,5 м и высотой 3,938 м, вместимостью 306 ячеек (по горизонтали — 34, по вертикали — 9), с производственной тарой на три заготовки либо детали.

Перед началом моделирования было предложено установить станки таким образом, чтобы загрузка и выгрузка деталей производилась тремя роботами-манипуляторами с заданными максимальными длинами перемещений. Доставка на участок и вывоз тары с заготовками осуществляется автоматическими управляемыми тележками (AGV). Поскольку в первую очередь, требуется проверить оптимальность построения технологической цепочки, обслуживание склада рассматривается по упрощенной схеме — при помощи двух кранов-штабелеров.

Средствами AnyLogic создается модель рассматриваемого автоматизированного участка с сохранением масштаба всех его элементов (рисунок 1).

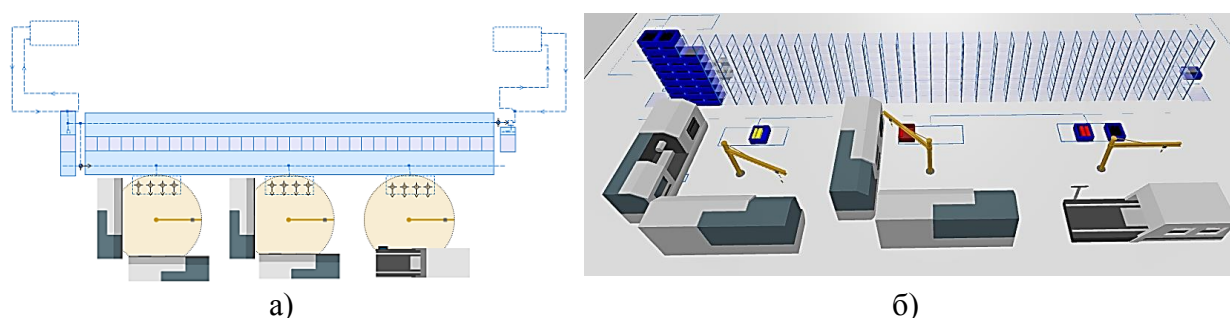


Рисунок 1 – Модель автоматизированного участка в AnyLogic:
а) 2D-модель; б) 3D-модель

Модель задается графически в виде диаграммы процесса, блоки которой представляют собой отдельные операции. Как правило, диаграмма процесса начинается с блока «источник», генерирующего агентов. Этот блок передает агентов в последующие

блоки диаграммы, задающие операции моделируемого процесса. Завершается диаграмма процесса, преимущественно, блоком, уничтожающим этих агентов [5, с. 141].

Агенты обладают типовым набором свойств, в соответствии с которым они

функционируют в среде. Они могут взаимодействовать с другими агентами, а также со средой, в которой размещены [6, с. 80]. Ресурсами называются объекты, используемые агентами для выполнения определенной операции [5, с. 159]. В нашем случае в качестве ресурсов выступают станки, краны-штабелеры, AGV и складской стеллаж. Поскольку агенты конкурируют за обладание ресурсами, это может приводить к задержкам, и практически во всех дискретно-событийных моделях присутствуют очереди [5, с. 141].

Рассмотрим порядок составления модели вышеописанного автоматизированного участка. Ввиду большого количества операций, сгруппируем их в блоки в зависимости от моделируемых процессов. Операции задаются при помощи элементов библиотеки моделирования процессов, названия которых, как и упоминаемые функции, для удобства выделены по тексту курсивом. Первый блок элементов, отвечающих за перемещение AGV с заготовками с выгрузкой последних на рольганг, приведен на рисунке 2.

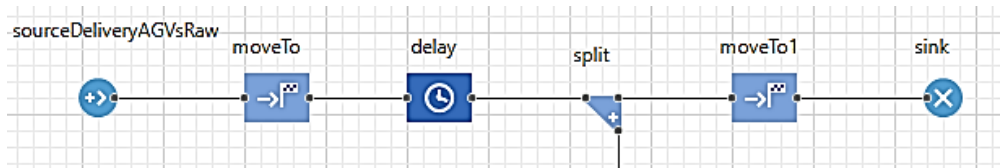


Рисунок 2 – Блок моделирования перемещения AGV с заготовками

SourceDeliveryAGVsRaw (по умолчанию – *source*) – источник создания (в данном случае – через фиксированный промежуток времени) одиночного агента AGV с установленной на нем производственной тарой, здесь же задается скорость перемещения агента, местоположение прибытия (узел *receivingDocRaw*). *MoveTo* описывает параметры перемещения агента AGV в отмеченный узел возле стеллажа. Траектории задаются при помощи элементов *path*.

достаточно достоверные результаты при моделировании системы.

Split создает для агента-оригинала заданное число новых агентов-копий и пересылает их дальше через порт *outCopy* (название на диаграмме не показано, соответствует нижнему ответвлению *split*). В данном случае правое ответвление создает отдельного агента AGV без тары, нижнее ответвление создает агента-копию тары. *MoveTo1* отвечает за перемещение AGV без тары обратно к узлу *receivingDocRaw*. *Sink* – уничтожает поступившего в узел *receivingDocRaw* агента AGV, имитируя выезд AGV за территорию участка.

Delay задерживает агента AGV на определенный период времени. Указанная задержка требуется для учета времени выгрузки тары с AGV на рольганг (в модели не показан). Средствами AnyLogic возможно создание имитационных моделей с высокой степенью детализации, однако, в рамках рассматриваемой работы достаточно применение упрощенных методов, дающих

Рассмотрим следующий блок операций, идущих вслед за нижним ответвлением *split*, отвечающим за перемещение тары (рисунок 3).

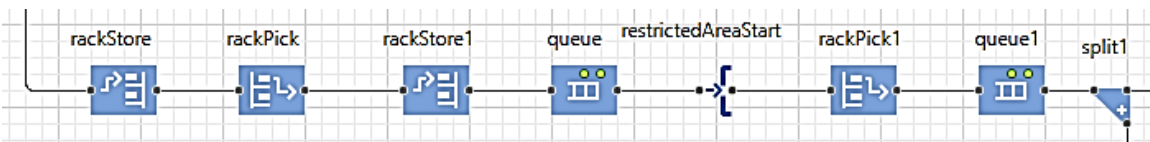


Рисунок 3 – Блок моделирования перемещения заготовок в таре на стеллаж

RackStore помещает тару в ячейку малого стеллажа *palletRack1* (одна ячейка в высоту и ширину) справа от основного, имитируя передвижение по рольгангу в точку

захвата краном-штабелером вновь прибывшей тары. Время на перемещение по рольгангу было ранее учтено в вышеописанном блоке *split*.



Элемент *rackPick* извлекает тару из ячейки стеллажа *palletRack1* и перемещает ее в заданный узел сети. В качестве ресурса для перемещения выступает *stacker1* – кран-штабелер 1.

RackStore1 помещает тару в ячейку основного стеллажа краном-штабелером 1. При этом, стеллаж задан при помощи элемента *RackSystem*, моделирующего зону хранения, способную состоять из набора стеллажей и проходов между ними. *RackSystem* в своих свойствах ссылается на один *palletRack* (основной стеллаж), заданный с вышеописанным количеством ячеек, а также с учетом масштаба. На этапе начала создания модели пока нет необходимости создавать группу стеллажей и проходов, однако, в дальнейшем это может потребоваться, поэтому предусмотрено заранее.

Queue моделирует очередь единиц тары, ожидающих приема объектами, следующими за данным в потоковой диаграмме. Перемещение осуществляется в очереди с определенным порядком, в данном случае – согласно правилу FIFO (в порядке поступления).

Объект *RestrictedAreaStart* обозначает вход в область процесса, в котором одновременно может находиться ограниченное количество агентов. Для *RestrictedAreaStart* обязательно в дальнейшем должен быть задан выход объектом *RestrictedAreaEnd*. Агенты принимаются только до тех пор, пока разность количества агентов, поступивших в *RestrictedAreaStart*, и количества агентов, покинувших *RestrictedAreaEnd*, не достигнет заданного ограничения «Вместимость». После этого новые агенты смогут войти в область только тогда, когда какие-нибудь агенты ее покинут. В рамках задачи считается, что одна рабочая станция на которой размещается тара с заготовками, может вместить только 4 единицы тары, что задается в *RestrictedAreaStart*. Объект *rackPick1* отвечает за извлечение краном-штабелером 2 тары и ее перемещение на рабочую станцию (узел *tableMilling*). *Queue1* задает порядок перемещения тары согласно правилу FIFO.

Обработка на первой операции моделируется блоком, представленным на рисунке 4.

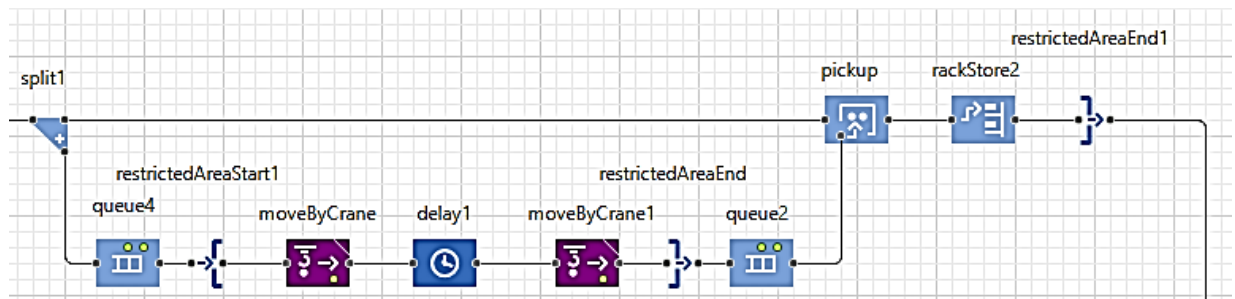


Рисунок 4 – Блок операций диаграммы процесса для моделирования первой технологической операции

Split1 создает «разделение» тары и заготовки путем создания копии первоначальной тары и задания нового агента заготовка в количестве трех штук. Для заготовок в *queue4* задается правило FIFO.

RestrictedAreaStart1 ограничивает максимальное количество заготовок, забираемых роботом-манипулятором для одновременной обработки на станке одной штукой.

Поскольку рассматриваемая модель разрабатывается на начальном этапе моделирования участка и пока не требует высокой детальной точности при визуализации, в качестве объекта для перемещения робота-

манипулятора использован элемент *moveByCrane*, который обеспечивает схожее перемещение заготовки что и выполняемое роботом-манипулятором в реальных условиях, при этом не требует усложнения диаграммы. В объекте *moveByCrane* задается движущий агент, который перемещает заготовку в узел, расположенный в рабочей зоне фрезерного станка. При этом во вкладке «Действия», задается, что «При входе» (в момент, когда заготовка захватывается роботом-манипулятором), цвет тары меняется на серый. Введение дополнительной цветовой индикации изменения состояния агентов удобно при запуске визуализации

модели.

В *delay1* определено время обработки заготовки на станке согласно первой операции технологического процесса. Во вкладке «Действия» заданы дополнительные параметры для визуализации: пока фрезерный станок работает – заготовка не видна, дверцы станка закрыты, когда обработка закончилась – заготовка становится видимой, но меняет цвет с исходного черного на красный, дверцы станка открыты. *MoveByCrane1* возвращает заготовку обратно в тару. *RestrictedAreaEnd* сигнализирует системе AnyLogic, что обработка первой заготовки завершена и можно приступить к обработке следующей заготовки.

Queue2 определяет правило FIFO для перемещения обработанных заготовок. *Pickup* удаляет агентов из заданного объекта

queue2 и добавляет их к содержимому поступающего агента-контейнера (тары). Когда все три обработанные заготовки оказываются в таре, её цвет меняется с серого на оранжевый. *RackStore2* возвращает тару с заготовками в *rackSystem* при помощи крана-штабелера 2. *RestrictedAreaEnd1* завершает *RestrictedAreaStart*, сигнализируя системе AnyLogic, что на рабочей станции возле фрезерного станка (узел *tableMilling*) освободилось место для тары, которое нужно заполнить.

Тем временем, тара с заготовками после первой операции и временного размещения на стеллаже, аналогичным образом перемещается для прохождения второй операции на вторую рабочую станцию в середине цеха. Производятся аналогичные действия с некоторыми уточнениями (рисунок 5).

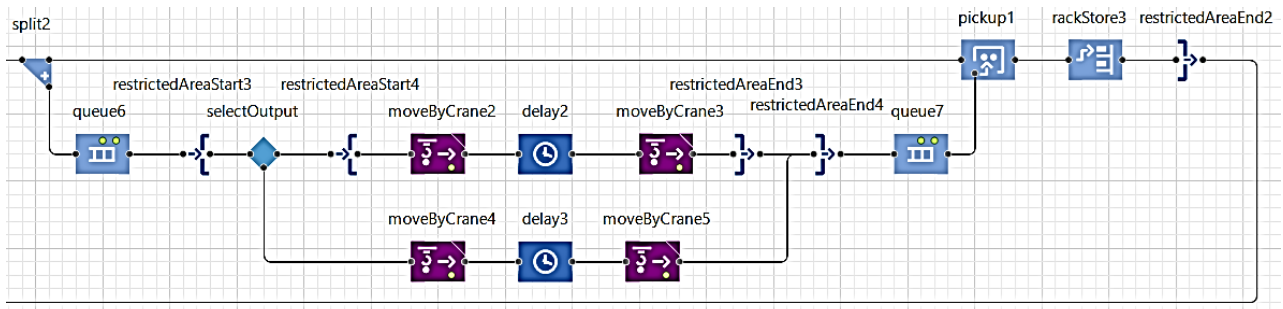


Рисунок 5 – Часть блока операций диаграммы процесса для моделирования второй технологической операции

В *restrictedAreaStart3* задается вместимость – две заготовки, поскольку вторую операцию выполняют сразу два станка. Кроме того, в диаграмме появляется ранее неопределенный объект – *selectOutput*, который направляет входящие заготовки в один из двух выходных портов в зависимости от выполнения заданного условия. Условие – «!*restrictedAreaStart4.isBlocked()*» - возвращает true, если вход в область заблокирован, и false - если нет. Таким образом, самая

первая заготовка поступит на первый станок, а последующие на тот, который освободится первым.

Для третьей завершающей операции параметры задаются аналогично со второй. По завершению третьей операции, готовые детали в таре посредством *rackStore4* устанавливаются на основной стеллаж. Теперь требуется вывести детали из участка в другой цех. Блок операций для перемещения готовых деталей приведен на рисунке 6.

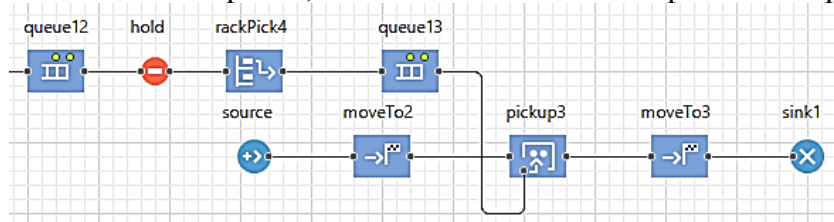


Рисунок 6 – Блок операций диаграммы процесса для моделирования вывода тары с готовыми деталями за территорию автоматизированного участка

Queue12 задает последующее перемещение тары согласно правилу FIFO,

кроме того, в нем во вкладке «При входе» задается свойство *source.inject(1)* для вызова



ресурса AGV, что будет описано далее. *Hold* блокирует перемещение тары, т.к. в рассматриваемой модели необходимо, чтобы кран-штабелер 1 не забирал тару с деталями пока не придет AGV, до этого момента тара будет находиться на стеллаже. Как только тара с деталями помещается на стеллаж, команда *source.inject(1)* вызывает одну единицу ресурса *source*. *Source* создает агента AGV, который появляется из узла *receiving-DocPart* с заданной скоростью. Остальные параметры перемещения, такие как траектория и пункт назначения, определены в элементе *moveTo2*. Когда AGV подъезжает к точке забора тары, запускается работа элемента *pickup3*, который производит разблокирование *hold*, «переносит» тару на AGV. Затем тара, в соответствии с *moveTo3* перемещается в узел *receivingDocPart*, при достижении которого AVG с тарой уничтожается элементом *sink1*.

Для получения адекватных результатов функционирования автоматизированного участка, модель должна быть стохастической, т.е. время выполнения некоторых задержек и событий должно быть задано случайными величинами. Преимущество построенной модели состоит в том, что она является удобным инструментом для исследования различных элементов автоматизированного участка без натуральных исследований, которые невозможно было бы произвести ввиду необоснованно высоких затрат денежных средств, временных и трудовых ресурсов.

Указанную модель теперь можно проверить на «стойкость» к поломкам, задавая различные нештатные ситуации посредством стохастических зависимостей, кроме того теперь становится возможным проверить правильность расположения оборудования с учетом имеющегося архитектурного решения и предварительно заданной логистики. Подобные автоматизированным участкам системы крайне сложно, а в некоторых случаях практически невозможно эффективно анализировать, опираясь исключительно на аналитический моделирование, предполагающее использование систем алгебраических, дифференциальных,

интегральных уравнений, связывающих выходные переменные с входными. Применение специальных платформ, например, AnyLogic, позволяет решать широкий спектр задач для обеспечения эффективного изготовления деталей общего и специального машиностроения в условиях мелкосерийного производства с частой сменой выпускаемой номенклатуры деталей и ограниченных производственных ресурсов.

Выводы:

В статье описан алгоритм построения диаграммы процесса для дискретно-событийного моделирования в программе AnyLogic автоматизированного участка механической обработки деталей типа тел вращения. Модель производственного участка может быть использована для оптимизации производственно-технологического потока без применения натуральных испытаний.

Список литературы

- 1 Имитационное моделирование производственных систем/Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилова.— М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. — 416 с.
- 2 Ревина И. В., Бояркин Г. Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // ОНВ. 2018. №6 (162). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-proizvodstvennogo-protsessa-izgotovleniya-detaley> (дата обращения: 30.07.2020).
- 3 Хватов, Б.Н. Гибкие производственные системы. Расчет и проектирование : учеб, пособие / Б.Н. Хватов. - Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. - 112 с.
- 4 AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 10.10.2020).
- 5 Григорьев И. AnyLogic за 3 дня: практическое пособие по имитационному моделированию. AnyLogic, 2017. - 273 с.
- 6 Куприяшкин, А.Г. Основы моделирования систем [Текст]: учеб, пособие / А.Г. Куприяшкин; Норильский индустр. ин-т. -Норильск: НИИ, 2015. - 135 с.