

*С. О. Эноярви, С. Н. Ткаченко, И. С. Маклахова  
Т. А. Карпинская, А. В. Пец*

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КЛАПАНА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО УЗЛА УПРАВЛЕНИЯ

56

*Рассмотрена разработка имитационной модели процесса производства клапана электропневматического узла управления в среде AnyLogic. Модель разрабатывается для поиска простоев в производственных операциях. Смоделирована работа трех структур, задействованных в производстве рассматриваемой детали: склад, механический цех и сборочный цех. В результате работы имитационной модели найдены места простоев, что позволило сократить время производства на 17 %.*

*The paper considers the development of a simulation model of the valve production process of the electro-pneumatic control unit in AnyLogic environment. The model is designed to find downtime in production operations. The work of three structures involved in the production of the considered part is simulated: a warehouse, a machine shop and an assembly shop. As a result of the simulation model, downtime was found, which reduced production time by 17 %.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, оптимизация, AnyLogic.

**Keywords:** simulation model, optimization, AnyLogic.

### Введение

Современное имитационное моделирование производственных процессов позволяет воспроизводить последовательность выполнения операций или этапов производственного процесса путем моделирования его отдельных элементов, а также определить лучший тип производственной линии с получением оптимальных показателей, возможностью выполнить тестирование с множеством параметров производства, включая пропускную способность потока и количество необходимого оборудования [1].

Естественно, что при создании имитационной модели необходим индивидуальный подход к каждой из них, даже если речь идет о похожих процессах одного и того же производства. При этом изменение любой составляющей модели может привести к изменению моделирования всего процесса в целом.

В качестве моделируемого объекта в данной работе выступал клапан электропневматического узла управления ЭПУУ-15 (сборочная единица БКРА2.505.000), производимый ООО Завод «Калининградгазавтоматика», который специализируется на производстве распределительного оборудования для нефтегазовой отрасли.



Актуальность имитационного моделирования определяется необходимостью обнаружения мест простоев процесса производства данной сборочной единицы.

### Разработка имитационной модели

В качестве среды для моделирования была выбрана *AnyLogic*, поскольку эта среда поддерживает проектирование, разработку и документирование модели, позволяет выполнить компьютерные эксперименты с моделью, включая различные виды анализа — от анализа чувствительности параметров модели до их оптимизации по выбранному критерию.

Данный программный продукт имеет возможность создавать модели с помощью всех трех современных подходов: дискретно-событийного, агентного и системной динамики. Три эти метода могут использоваться в какой угодно комбинации на базе одного программного обеспечения, чтобы смоделировать систему любой сложности.

Одним из наиболее важных преимуществ *AnyLogic* является возможность быстрого построения многоагентных моделей, которую не дает ни один из существующих инструментов. Только агентные модели позволяют получить представление об общем поведении системы. При изменении параметров одной составляющей меняется поведение всей системы [2].

Моделирование велось на основе типовых процессов, под каждый цех предприятия была выделена своя область. Это было сделано, во-первых, для упрощения визуального восприятия модели, а во-вторых, для обозначения конкретных мест для работы ресурсов. Размеченные области были названы и расположены в соответствии с порядком выполнения процессов производства клапана.

Первым шагом было создание входного потока данных «поступление\_материала». В свойствах были заданы следующие параметры:

- интенсивность прибытия: 1000 прутков в месяц (именно такое количество прутков требуется для выполнения усредненного ежемесячного заказа электропневматических узлов управления);
- максимальное количество прибытий: 1000.

Далее был создан новый агент «погрузчик» в количестве 2 с максимальной разрешенной скоростью 10 км/ч. Данный агент привязан к ресурсу «погрузчик», а ресурс, в свою очередь, к входному потоку данных. Ресурс и агент названы одинаково для удобства. Для агентов «погрузчик» был сделан узел «парковка\_погрузчиков», имитирующий реальную парковку погрузчиков на предприятии, куда они возвращаются по завершении своей работы. В узел «парковка\_погрузчиков» были добавлены аттракторы для задания определенного положения агентов «погрузчик».

Затем были добавлены такие блоки, как *RackStore*, названный «загрузка\_стеллажей», и *RackPick*, названный «перемещение\_материала». Они имитируют загрузку прутков на стеллажи и отгрузку для дальней-

шей перевозки. Между этими блоками вставлен блок Delay, названный «процесс\_погрузки» и имитирующий задержку по времени в процессе загрузки и разгрузки материала.

В свойствах Delay введены параметры:

- время задержки – triangular (10, 15, 20) мин. Это значит, что на погрузку и разгрузку материала будет уходить минимум 10 мин, максимум 20, а в среднем – 15;

- место агентов – path. Так назван путь от места агентов «парковка\_погрузчиков» до разметки пространства «транспортировка», идущий через проход стеллажа. То есть при запуске модели во время погрузки и разгрузки материала агент «погрузчик» будет двигаться по заданному пути.

В RackStore заданы следующие свойства:

- стеллаж / зона хранения. В этом свойстве привязывается объект, куда будет загружаться материал. В данном случае это объект palletRack, имитирующий два стеллажа с одним проходом, количеством ячеек – 20, количеством ячеек в глубину – 1, количеством уровней – 6 и высотой уровня – 30;

- время поднятия на уровень – 40 с;

- место агентов – «парковка\_погрузчиков»;

- агент – «погрузчик».

Для RackPick заполнены поля:

- стеллаж / зона хранения – тот же palletRack, поскольку погрузка и отгрузка материала происходит с одного и того же стеллажа;

- узел – «транспортировка». Это прямоугольный узел с ограничением для скорости транспортеров в 10 км/ч. Все прямоугольные узлы предназначены только для визуализации процесса;

- взять агента из – ячеек;

- время понижения на уровень – 40 с;

- набор ресурсов – погрузчик.

Таким образом, смоделирована работа склада. Модель представлена на рисунке 1.

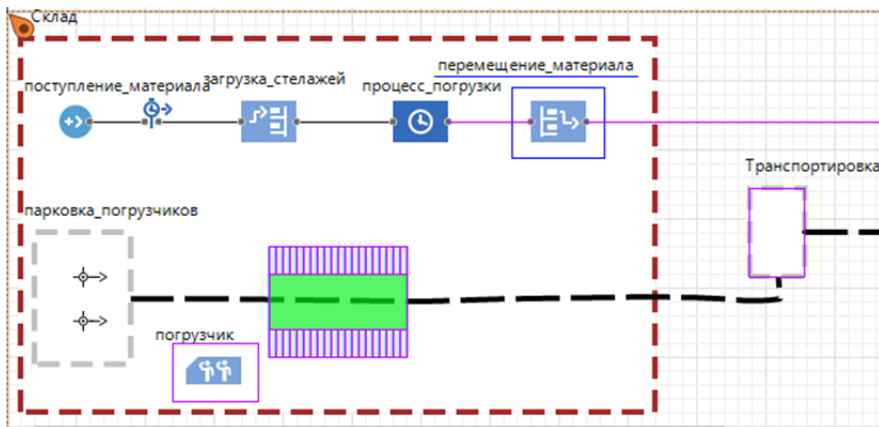


Рис. 1. Модель склада



От блока RackPick «перемещение\_материала» поток направлен в блок service, названный «партия». Данный блок объединяет два рассмотренных в предыдущей главе блока: queue и delay, то есть задерживает агентов и одновременно имитирует очередь. Он удобен тем, что для визуализации к нему можно привязывать ресурсы. Для «партии» были созданы одноименные агенты и ресурсы «грузчик», в количестве 4 и скоростью передвижения 5 км/ч. Для них же был обозначен прямоугольный узел «отгрузка» как место работы.

Итак, service «партия» содержит следующие свойства:

- наборы ресурсов – «грузчик» в количестве 2;
- время задержки – triangular (7, 10, 13) мин;
- место агентов – узел «отгрузка»;
- место агентов – path2. Это путь для передвижения агентов от «партии» к следующей операции.

Следующей идет операция, обозначенная в маршрутной карте номером 010. В модели она сохраняет название. На самом деле это операция абразивно-отрезной обработки в механическом цеху.

Промоделировано данное событие с помощью блока service «\_010». Для имитации рассматриваемой операции были созданы агент «резчик\_на\_пилах» с максимальной скоростью передвижения 5 км/ч и ресурс «\_17928» в количестве 1. Базовое расположение данного ресурса – это прямоугольный узел «Стан\_9300». Узел так назван, потому что абразивно-отрезная операция в соответствии с маршрутной картой ведется на отрезном станке с номером 9300. В узел «Стан\_9300» добавлен 3D-объект «отрезной станок».

Свойства service – «\_010»:

- набор ресурсов – «\_17928»;
- вместимость очереди – 1. Введено данное значение, так как одновременно на одном станке одним рабочим может обрабатываться только один прут;
- время задержки – 3,6 с. Данное значение введено в соответствии с маршрутной картой;
- место агентов (очередь) – прямоугольный узел «Стан-9300», то есть место, где они ожидают поступления на станок;
- место агентов – path3. Это путь, по которому заготовки перейдут к следующей операции.

Две вышеописанные операции, происходящие в механическом цеху, производятся на участке №16. Затем осуществляется транспортировка заготовок на другой участок.

Для имитации транспортировки использовался блок delay «\_020». Назван блок в соответствии с маршрутной картой. Блок настроен следующим образом:

- время задержки – triangular (10, 13, 16) мин;
- вместимость – 600;
- место агентов – прямоугольный узел «перемещение».

Заготовки перевозятся от участка №16 на участок №14, где происходят следующие операции: токарная операция и промывка. В токарную входят подоперации: «торцевать», «точить», «центрировать», «свер-



лить», «расточить отверстия», «нарезать резьбу», «выполнить фаску», «отрезать заусенцы», «каждую деталь продуть сжатым воздухом», «убрать стружку». Все перечисленные подоперации осуществляются на станке с числовым программным управлением EMCOTURN E25 под наблюдением оператора.

Итак, операция токарная промоделирована с помощью блока service и в соответствии с маршрутной картой названа «\_030».

Для работы данного блока были созданы агент «оператор\_станков» и ресурс «\_16045» в количестве 1, скорость передвижения — 5 км/ч. При прохождении через данный ресурс всех заготовок он не удаляется, а завершается его смена. К данному ресурсу, естественно, привязан агент «оператор\_станков». Базовое место работы ресурсов — прямоугольный узел «Emcoturn».

Service «\_030» содержит следующие свойства:

- набор ресурсов — «\_16045»;
- вместимость очереди — 1, так как станком одновременно может обрабатываться только одна заготовка;
- время задержки — 136,8 с;
- место агентов (очередь) — прямоугольный узел «Emcoturn»;
- место агентов — path5. Это путь для перехода заготовок к операции промывки.

Для имитации операции промывки был также использован блок service и назван «\_040». Для полноценной работы блока был создан новый агент «промывщик\_деталей» в количестве 1 с максимальной скоростью передвижения 5 км/ч. Данный агент был привязан к ресурсу «\_17405» с прямоугольным узлом «ванна\_промывки» в качестве базового места расположения. В этот прямоугольный узел перемещен 3D-объект промывочной ванны.

Две рассмотренные операции проводятся на участке №14.

Далее от операций «\_010» и «\_040» 5 % всего потока заготовок отправляются на контроль, а 20 % операции «\_030» — на участок №70. Сам участок обозначен прямоугольным узлом.

Для имитации контроля между блоками операций «\_010» и «\_020» размещен блок SelectOutput, названный «контроль» и позволяющий сделать так называемую развязку. То есть теперь от блока операции «\_010» часть заготовок идет на операцию «\_020», а случайные 5 % идут на операцию «\_050», имитирующую контроль изделий.

Затем между блоками операций «\_030» и «\_040» также был вставлен блок SelectOutput, названный «контроль\_2». С помощью этого блока от операции «\_030» случайные 20 % идут на «\_050», а оставшаяся часть переходит на промывку «\_040». Уже из «\_040» 5 % идут тоже на «\_050», а остальные заготовки, минуя контроль, транспортируются в другой цех.

Операция контроля «\_050» совершается в механическом цеху, но на участке №70.

Операция «\_050» проимитирована с помощью блока Assembler. Блок имеет пять портов на входе и один на выходе. Assembler задерживает агентов по заданным параметрам, а остальные пропускает без задержки. Задержанных агентов он обрабатывает с заданным временем.



После операции «\_050» добавлен блок SelectOutput «брак» для выхода из модели агентов, не прошедших контроль. Данному блоку присвоена вероятность 0,001, что считается нормой для данного производства. Выход агентов из системы осуществлен с помощью объекта Sink «утиль».

Операции «\_050» заданы следующие параметры:

- количество 1 – (int)exponential (0.05). К первому входу присоединен путь от операции «\_040»;
- количество 2 – (int)exponential (0.05). Ко второму входу присоединен путь от операции «\_010»;
- количество 3 – (int)exponential (0.2). К третьему входу присоединен путь от операции «\_030»;
- новый агент – «грузчик», так как доставку от участка № 14 осуществляет грузчик;
- набор ресурсов – «грузчик» в количестве 2. Изначально было создано 4 «грузчика»: 2 из них привязаны к «отгрузке», а 2 – к узлу «транспортиров», находящемуся на участке № 70;
- время задержки – triangular (30, 40, 60) с.

И последняя операция в участке №70 – это транспортировка прошедших контроль заготовок на участок сборки №13.

Транспортировка «\_060» промоделирована с помощью блока delay со следующими свойствами:

- время задержки – triangular (5, 6, 7) мин;
- максимальная вместимость;
- место агентов – path7. Это путь, по которому заготовки будут перемещаться в сборочный цех.

Таким образом, промоделирована работа механического цеха, результат представлена на рисунке 2.

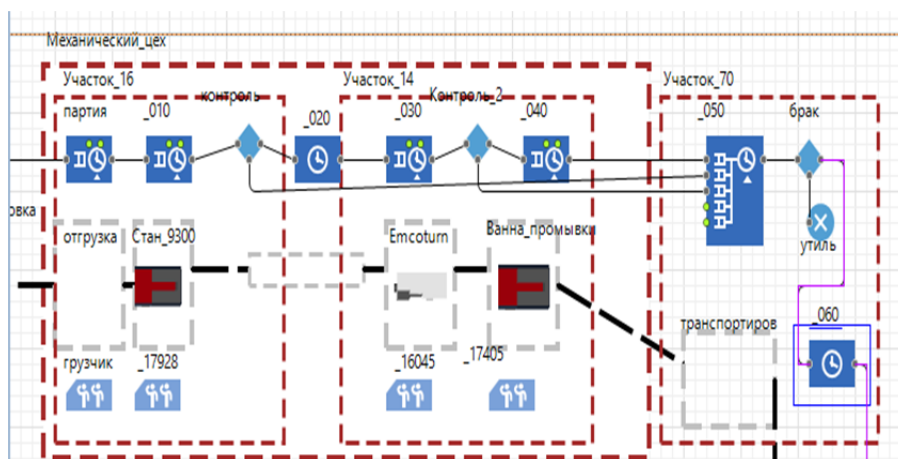


Рис. 2. Модель механического цеха



Конечным пунктом процесса производства клапана является сборочный цех.

Первая операция на данном этапе – непосредственно сборка. Операция выполняется на участке №13. В маршрутной карте по данному участку выполнение сборки считается одной операцией. Опираясь на это, промоделируем ее с помощью блока Service. Данный блок Service именуется «\_010\_13».

Для реализации сборки создан новый агент «Слесарь\_механосборочных\_работ», скорость передвижения агента – 5 км/ч.

Также создан ресурс «\_18466» в количестве 1. Как уже было сказано ранее, сборка ведется одним человеком. Помимо этого, создано базовое место для ресурсов с помощью прямоугольного узла «сборка».

Сам блок «\_010\_13» имеет следующие свойства:

- наборы ресурсов – «\_18466» в количестве 1;
- вместимость очереди – 6, так как сам клапан собирается из 6 заготовок, поступивших из механического цеха. Резинки, болты, шурупы, томфлон не учитываются, поскольку этот расходный материал закупается и поставляется сразу на рассматриваемый участок;

- время задержки – 119 с. Точная информация получена из маршрутной карты;

- место агентов – node. Это точечный узел для анимации процесса. В описании у данного узла вписана строка «\_010\_13.size() > 0? red: green». То есть, если блок «\_010\_13» занят, то узел подсвечивается красным цветом, иначе – зеленым.

Далее клапан в сборке отправляется на пневматические испытания на прочность в составе с платой БКРАЗ.660.005.

На данном участке все испытания проводятся одним специалистом, поэтому были созданы агент «Слесарь\_испытатель» и, соответственно, ресурс «\_18454» в количестве 1 со скоростью 5 км/ч и базовым местом «испытание». Базовое место создано с помощью прямоугольного узла.

Операция проверки на прочность промоделирована при помощи блока Service. В Service «\_020\_13» включена в модель со следующими показателями:

- наборы ресурсов – «\_18454»;
- вместимость очереди – 6, так как на данном этапе не происходит объединение нескольких агентов в один. Поэтому рассматривается уже собранный клапан в виде 6 входных заготовок;

- время задержки – triangular (1, 1.5, 2) мин;

- место агентов (очередь) – «испытание»;

- место агентов – path8. Это путь, по которому агенты поступают на следующую операцию.

Последняя операция на участке №13 – это испытание на герметичность. Проводится испытание тем же агентом «Слесарь\_испытатель» и тем же ресурсом.

Операция проверки на герметичность промоделирована блоком Service и названа «\_030\_13». Для «\_030\_13» заданы свойства:

- наборы ресурсов – «\_18454»;



- вместимость очереди – 12, поскольку рассматривается уже собранный клапан в виде 6 входных заготовок, а испытание на герметичность проводится в сборе всего электропневматического узла управления, в состав которого входят 2 клапана;
- время задержки – triangular (2, 3, 4) мин;
- место агентов (очередь) – «испытание»;
- место агентов – path9. Это путь, по которому агенты выходят из данной операции.

После проверки примерно 0,1 % всех электропневматических узлов управления идет в брак, что объясняется человеческим фактором, так как большинство операций выполняется вручную.

После завершения всех операций клапан электропневматического узла считается произведенным и запущенным в работу узла в целом.

Модель сборочного цеха представлена на рисунке 3.

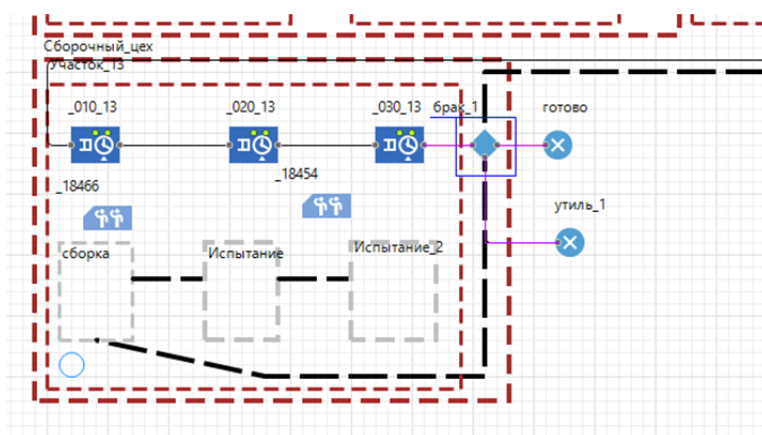


Рис. 3. Модель сборочного цеха

Для сбора статистики в имитационную модель добавлен объект «временной график» и назван «занятость\_грузчиков», поскольку график будет показывать статистику занятости ресурса «грузчик» на двух участках: участке приема материала (в модели это участок №16) и моменте транспортировки заготовок от участка №16 к участку №14.

В свойствах графика заданы следующие параметры:

- значение «грузчик\_на\_погрузке» – процесс\_погрузки.statsUtilization.mean (). У каждого блока delay есть встроенная функция statsUtilization, отвечающая за сбор статистики использования блока. Функция mean () возвращает усредненное значение;
- значение «грузчик\_на\_020» – \_020.statsUtilization.mean ();
- для каждой линии графика можно задать абсолютно любые цвет, толщину, стиль.

После запуска разработанной имитационной модели были обнаружены следующие места простоев:

- ресурс «грузчик» занят на 98 %;
- заготовки простаивают на шаге отгрузки в механический цех;





- ресурс «\_17928» занят на 90 %;
- ресурс «\_16045» занят на 93 %;
- ресурс «\_17405» занят на 94 %;
- ресурс «погрузчик» простаивает.

Результат симуляции представлен на рисунке 4.

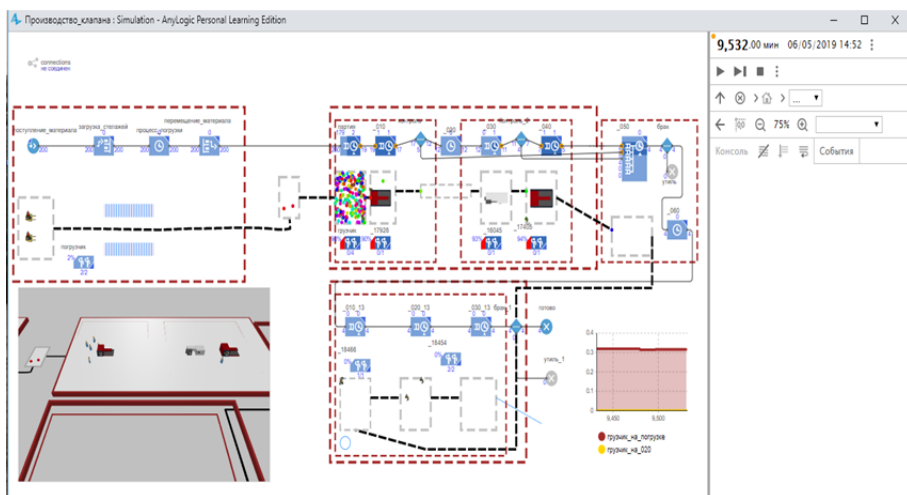


Рис. 4. Места простоев

Для визуального контроля занятости грузчиков на разных участках есть временной график. Из данного источника явно видно, что ресурс «грузчик» по большей части занят на этапе отгрузки материала и ресурса просто не хватает для работы на другом участке.

Большой процент занятости ресурсов «\_17928», «\_16045», «\_17405» объясним тем, что ресурсы привязаны к агрегатам с вместимостью в очередь 1, так как на предприятии в реальном времени лишь одна заготовка может одновременно обслуживаться на отрезном станке, EMCOTURN и промывочной ванне.

Время работы на данном этапе создания модели – 20 000 мин, что равняется примерно 36 рабочим дням. Данный временной промежуток превышает норму выполнения заказа, которой является месяц. Такие простои по времени влекут за собой огромные потери прибыли, перерасход трудовых ресурсов.

По каждому пункту были предложены методы устранения простоев. В совокупности или по отдельности методы приведут к оптимизации производственного процесса создания клапана электропневматического узла управления.

Проблема: ресурс «грузчик» занят на 98 %. Решение: было предложено ввести для ресурса «грузчики» расписания работы на каждом из участков. Это решение не требует дополнительных вложений в производственный процесс и не нарушает его структуру. Более того, внедрение такого решения быстро и эффективно.



Проблема: заготовки простаивают на шаге отгрузки в механический цех. Решение: эта проблема уйдет по мере внедрения предыдущего решения, так как сейчас в цехе нет четкого распорядка работ. Ресурсы «грузчик» выполняют последовательно и непрерывно операции, в которых задействован их ресурс. В каждом цеху не закреплен свой ресурс.

Проблема: ресурс «\_17928» занят на 90 %. Решение: закупка еще как минимум двух единиц нового оборудования и поиск соответствующего персонала. Предложенное решение требует затрат на оборудование в размере примерно 70 000 руб.

Проблема: ресурс «\_16045» занят на 93 %. Решение: закупка еще как минимум одной единицы нового оборудования EMCOTURN и поиск соответствующего персонала. Предложенное решение требует затрат в размере около 1 500 000 руб.

Проблема: ресурс «\_17405» занят на 94 %. Решение: закупка еще как минимум трех ванн промывок и поиск соответствующего персонала. Работа промывщика деталей и узлов крайне трудоемкая. Все операции проводятся вручную в постоянном шуме. Несмотря на спецодежду, слух промывщиков садится, поэтому спрос на данную вакансию минимален. Предложенное решение требует затрат в размере около 1 200 000 руб.

Проблема: ресурс «погрузчик» простаивает, так как занят всего на 2 %. Это проблема является следствием полной занятости ресурса «погрузчик», так как «грузчик» не успевает разгружать область «отгрузка» и не дает возможность «погрузчику» полноценно работать. Решение: наладить работу ресурса «грузчик».

Итак, после оценки всех решений возникших простоев был выбран наиболее оптимальный вариант оптимизации процесса – первое предложенное решение. Оно наиболее подходящее, так как не требует дополнительных вложений, быстро в реализации и внедрении, прибыльно и влечет за собой решение второй проблемы.

Для реализации этого решения в разработанной имитационной модели был использован элемент «расписание».

Изначально в системе есть ресурс «грузчик» в количестве 4. Необходимо распределить их количество поровну с помощью свойства «расписание доступности» между участками простоя или сразу для всех задать смены.

Для создания предложенных выше расписаний нужно обратиться в палитру «Агент» и использовать элемент «расписание». В данном случае будет создано два расписания, потому что нужно распределить ресурс «грузчик» между двумя областями. Эти элементы будут названы «работа\_грузчиков» и «работа\_грузчиков\_2».

Первое расписание задано следующим образом:

- тип – целое, так как речь идет о ресурсе, в реальном процессе которым является человек;
- расписание задает – интервалы (начало / конец);
- длительность – дни. Расписание одинаково для каждого из дней;
- повторять каждый – один день;



– расписание доступности: начало смены в 8:00, конец в 12:00, количество задействованных ресурсов – 4. То есть с 8 утра до 12 дня весь ресурс «грузчик» будет задействован в одной области – например, области «отгрузка». Далее обязательно должен быть перерыв, который задается неявно. Между двумя расписаниями будет перерыв в 1 ч. Следующее расписание будет начинаться с 14:00.

Второе расписание задано следующим образом:

– тип – целое, так как речь идет все о том же ресурсе, в реальном процессе которым является человек;

– расписание задает – интервалы (начало / конец);

– длительность – дни. Расписание одинаково для каждого из дней;

– повторять каждый – один день;

– расписание доступности: начало смены в 14:00, конец в 16:00, количество задействованных ресурсов – 4. То есть с 14:00 и до конца рабочего дня весь ресурс «грузчик» будет задействован в одной области – например, области «перемещение».

Затем в ресурс «грузчик» подгружаются созданные расписания. После этого в свойства рассматриваемого ресурса вносятся изменения:

– количество задано – сменами: расписаниями групп;

– расписания – «расписания\_грузчиков» и «расписание\_грузчиков\_2»;

– базовое местоположение – «отгрузка» и «перемещение».

Данные расписания не пересекаются.

Следуя созданным расписаниям, ресурс «грузчик» будет последовательно задействован. Сначала будет происходить разгрузка на механообработывающий цех, что запустит работу этого цеха, затем ресурс будет работать в области «транспортировка» из механического цеха на контроль и сборку, что разгрузит работу цехов.

## Выводы

Была разработана имитационная модель процесса производства клапана электропневматического узла управления.

Результатом имитационного моделирования является выполнение заказа в 1000 клапанов за 16800 мин имитационного времени, что составляет примерно 30 рабочих дней.

Модель была оптимизирована путем добавления расписаний для ресурсов. Оптимизация модели повлекла за собой следующие результаты:

– заказ выполняется в норму времени (месяц);

– работа ресурсов разгружена, 60 %;

– ресурс «погрузчик» загружен на 58 %;

– система работает стабильно;

– производственный процесс создания клапана электропневматического узла управления налажен.

Общим результатом является снижение времени производства на 17 % по сравнению с неоптимизированным процессом.



### Список литературы

1. Лоу А., Кельтон Д. Имитационное моделирование. СПб., 2014.
2. Мезенцев К. Н. Моделирование систем в среде AnyLogic. М., 2015.

### Об авторах

Светлана Олеговна Эноярви – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: rautkina-sweta@mail.ru

Сергей Николаевич Ткаченко – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: tkasergey@yandex.ru

Ирина Сергеевна Маклахова – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: imaklakhova@mail.ru

Татьяна Александровна Карпинская – доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: TKarpinskaya@kantiana.ru

Александр Васильевич Пец – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: APets@kantiana.ru

### The authors

Svetlana O. Enoyarvi, Master's Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: rautkina-sweta@mail.ru

Dr Sergey N. Tkachenko, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: tkasergey@yandex.ru

Irina S. Maklakhova, Assistant Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: imaklakhova@mail.ru

Tatyana A. Karpinskaya, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: TKarpinskaya@kantiana.ru

Dr Alexander V. Pets, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: APets@kantiana.ru