

УДК 658.5.012.1

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕХА

© 2013 Н.Д. Проничев, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева, А.Н. Малыхин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье рассматривается вопрос применения средств имитационного моделирования для оптимизации производственной системы. Анализируется производственный цех по заданной производительности, оптимизируется движение материального потока и загрузка рабочих мест производственного участка, найдены оптимальные размеры накопителей.

Ключевые слова: имитационное моделирование, производственная среда, оптимизация, «узкое» место, загрузка оборудования

Сегодня конкурентное производство должно владеть не только современными технологиями изготовления деталей, высокотехнологичным оборудованием, высококлассными специалистами, но и соответствующими методами организации, как самого процесса производства, так и конструкторско-технологической подготовки этого производства.

Имитационное моделирование – это информационный инструмент при проектировании и организации производства.

С помощью методов и принципов имитационного моделирования, как основополагающего элемента концепции «бережливого производства», можно достичь эффективной реализации непрерывного поточного производства. Прямым следствием является значительное сокращение длительности производственного цикла, объемов незавершенных работ и запасов готовой продукции, оптимизация загрузки оборудования и использования ресурсов предприятия.

Методология имитационного моделирования совпадает с концепцией технологического перевооружения предприятия, реинжиниринга. И это действительно так, изначально мы допускаем «несовершенство» первоначальных данных, ана-

лизируем и исправляем недостатки с целью исследования производственной системы.

С помощью данных средств можно решить две промышленные задачи, задачу достижения выходных параметров системы: определение производственной программы и себестоимости, и задачу оптимального выбора и размещения оборудования, оснастки, организации материальных потоков под требуемую производительность. Первая задача предоставляет различные варианты организации производственной системы, а вторая задача оптимизирует текущую систему с сокращением расходов.

Как уже было отмечено, для конкурентной борьбы на рынке необходимо быстро реагировать на изменяющийся спрос, т.е. быть предприятием с адекватно и быстро перестраиваемой номенклатурой продукции. Организация гибкого многономенклатурного производства невозможна без информационных технологий.

Поставленная задача оптимизации производственного процесса, это, прежде всего, нахождение оптимальной производственной программы выпуска изделий, длительности производственного цикла, уточнение и корректировка станкоёмкости, определение совокупного материало потока и компоновка производственной системы. С помощью использования имитационного моделирования решается вопрос анализа различных вариантов формирования производственной системы, распределения материало потоков.

Процессы в имитационной модели изменяются во времени. При составлении такой модели используются два компонента: статический компонент, описание структуры системы, и динамический компонент, описание взаимодействия ее элементов.

---

*Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: pdla@ssau.ru*

*Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, заведующий лабораторией аддитивных технологий. E-mail: pdla\_smelov@mail.ru*

*Кокарева Виктория Валерьевна, аспирант, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: charming\_carrot@mail.ru*

*Малыхин Андрей Николаевич, магистрант кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: 19891104@bk.ru.*

Моделируемый процесс представляется как поток деталей (заготовок) в системе обработки. Каждая деталь стремится занять свое место в обрабатывающем устройстве (ОУ) – обрабатывающем центре, образуя при этом очереди перед ОУ, если они заняты. Таким образом формируются потоки деталей между ОУ. Существуют истоки и стоки деталей. Блок-схема модели, описывающая маршруты движения деталей в системе, представлена на рис. 1.

Основной параметр представленной системы – время поступления деталей на обрабатывающий центр. Поток деталей рассматривается как случайный процесс, характеризующийся функцией распределения периода поступления (например, простейший поток, поток Эрланга).

В момент выполнения операций ОУ занят. Если ОУ свободен, то заготовка/деталь начинает обрабатываться. Обработка каждой детали обрабатывающим центром означает задержку в нем детали на время, равное периоду обработки. После обслуживания деталь покидает обрабатывающий центр. Таким образом, обрабатывающий центр характеризуется временем обслуживания детали, временем обработки детали.

Итак, объектом имитационного моделирования является производственная система - механо-обрабатывающий цех и протекающие в нем процессы. При проведении модельных экспериментов можно варьировать состав и количество оборудования, осуществлять резервирование технических средств, для замены вышедшего из строя оборудования или появления новых срочных заказов на изготовления партий деталей. В каждой партии содержатся однотипные детали, технологический маршрут обработки которых задается с исходными данными в виде цепочки из видов оборудования, закрепленного за выполнение определенных типов операций технологического процесса.

В модели должна быть предусмотрена различная приоритетность обработки деталей в случае появления узких мест в связи с нехваткой оборудования по определенной операции технологического процесса. Так, партии деталей, имеющие высший приоритет имеют преимущество первоочередного занятия освободившегося оборудования. Для моделирования деятельности цеха необходимо учитывать следующий набор

параметров:

$X=[x(i)]$ ,  $i=1, I$  – множество типов деталей, обрабатываемых на участке;

$Y=[y(m)]$ ,  $m=1, M$  – множество групп оборудования, участвующих в процессе производства; (классификация производится по технологическому принципу, поэтому каждую группу оборудования должны составлять взаимозаменяемые станки);

$U=[u(m)]$ ,  $m=1, M$  – количество взаимозаменяемых станков в группе оборудования;

$W(i)=[w(i,1), w(i,2), \dots, w(i, j(i))]$  – технологический маршрут, где  $j$  - номер операции,  $j(i)$  – количество операций над деталью типа  $i$ ;

$W=\|w(i, j)\|$ ,  $i=1, I, j=1, \max(j(i))$  – матрица технологий;

$T=\|T(i, j)\|$  – матрица нормированных времен обработки на операциях;

$T_k=\|tk(i, j)\|$  – время проведения контрольных операций по видам деталей  $i$  и видам оборудования  $j$ ;

$T_d=\|td(i, j)\|$  – время осуществления транспортных операций.

Вся совокупность перечисленных данных готовится в производственно-диспетчерском бюро (ПДБ) цеха и вводится в модель в процессе моделирования в диалоговом режиме.

Входную информацию для построения имитационной модели разделили на пять разделов: организационная информация (приоритетность, порядок запуска партий, необходимость контрольных операций), оборудование (количество видов оборудования, наличие резервного оборудования), технологический процесс (количество операций, нормы времени, последовательность операций), объем и номенклатура (количество видов деталей, количество партий деталей), незавершенное производство (количество деталей в партии, незавершенных операций).

Выходную информацию распределили на два раздела: информацию по производству деталей (план запуска-выпуска, маршрут движений партий, время пролеживания партий, данные по НЗП), информацию по оборудованию (время работы оборудования, коэффициент загрузки оборудования, наличие очередей).

Основная задача применения имитационного моделирования - оценить организационно-технические характеристики производственной



Рис. 1. Структура процесса

системы: динамику загрузки оборудования и работников, длительность производственного цикла, величину незавершенного производства, время проведения и количество рабочих, порядок запуска изделий в производство, величину партии деталей. Применение имитационного моделирования в системах поддержки управленческих решений позволит обнаружить диспропорции в производственном процессе, наличие

“узких мест”, возникновение очередей предметов труда на обработку, дефицита рабочей силы на каких-либо участках производства, простои оборудования и работников. С помощью предложенной имитационной модели можно не только оценивать варианты возникших отклонений и сбоев, но и прогнозировать напряженные и аварийные ситуации. Блок-схема алгоритма модели участка цеха представлена на рис.2.

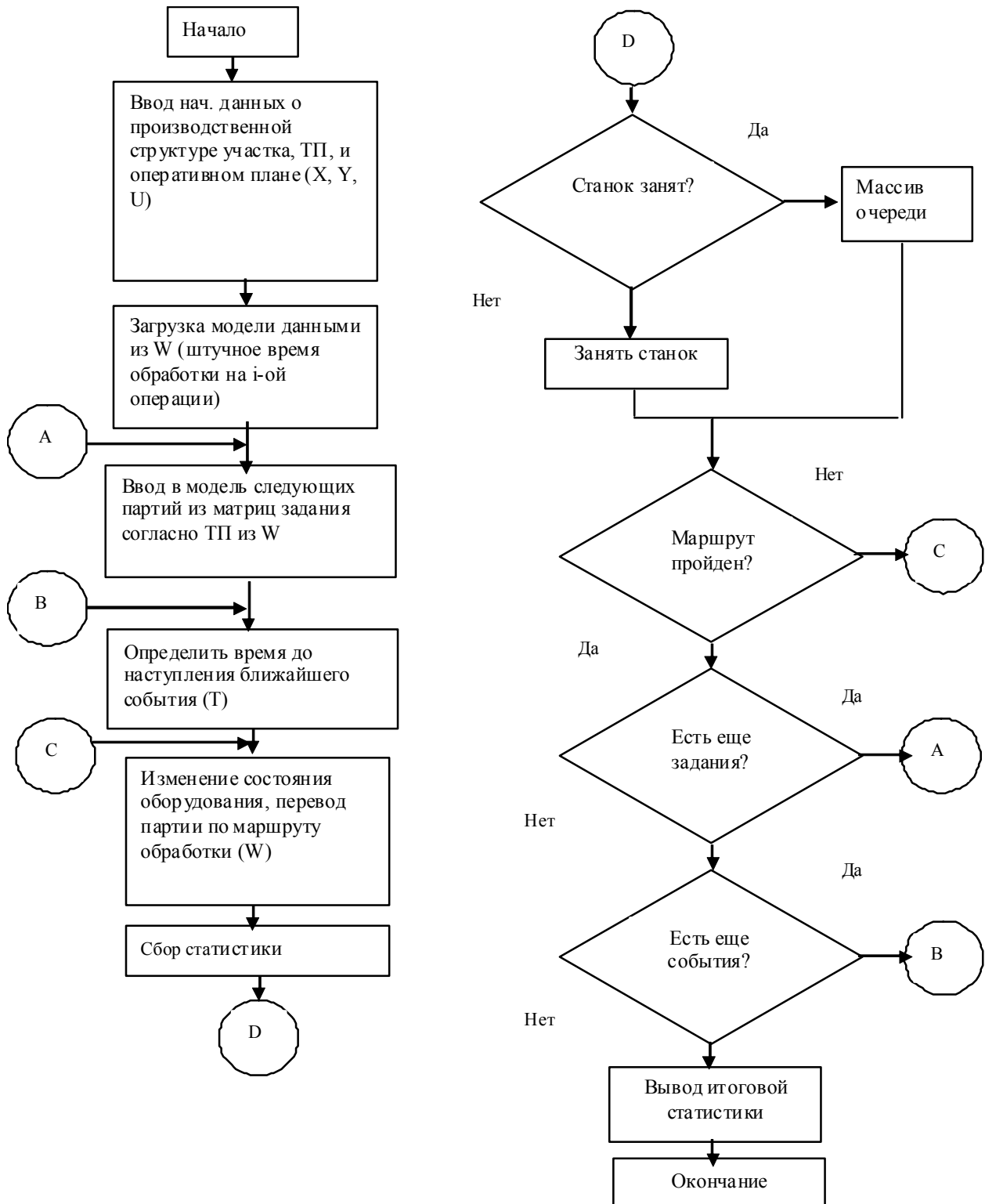


Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационной модели производственного участка

Для реализации предложенного алгоритма необходимо воспользоваться принципом цифрового производства - e – Manufacturing. В целом предложенную концепцию можно рассматривать как “Моделирование + Виртуализация”. Для реализации такой концепции необходимо хранить текстовые и графические данные, представленные в различных форматах; проводить имитационное моделирование исследуемых систем и процессов; визуализировать результаты моделирования.

В качестве инструмента построения цифрового производства использовали систему Tecnomatix Plant Simulation.

Данная система позволяет смоделировать технологический процесс производства изделия в виртуальной среде. Рассмотрев несколько вариантов, сравниваем их по эффективности и стоимости, предлагаем оптимальное проектное производственное решение. Кроме того, имитационная модель используется для оперативного управления.

По начальным данным (состояние оборудования, план выпуска продукции, требования по планово-предупредительному ремонту оборудования и пр.) анализируются возможные варианты, и выбирается оптимальный график производства по максимальной производительности или по минимальному отклонению от плана выпуска.

Целью моделирования является вычисление средней производительности, потребности в промежуточных накопителях, их емкости и влияние соотношения на среднегодовую производительность.

Такие параметры, как время работы оборудования, вместимость объекта, алгоритм работы накопителей, размеры партий продукта можно менять в диалоговом интерфейсе.

Основным типом визуализации в продукте является двумерная модель с анимацией на основе иконок, при котором изменение состояния объектов отражается меняющимися иконками.

Модели строятся из имеющейся библиотеки стандартных объектов, в которой имеются несколько основных разделов. Material Flow – объекты, предназначенные для обработки подвижных объектов. Например: Source (источник деталей), SingleProg (единичная операция), Buffer (накопитель); Movable Unis – подвижные объекты: Entity (деталь), Container (тара), Transporter (самодвижущийся транспорт). Information Flow – объекты для информационного обеспечения модели (переменные, таблицы, генераторы событий, интерфейсы обмена данными, методы для обработки событий). User Interface – объекты для представления данных (графики, диаграммы). При моделировании подвижные объекты перемещаются по созданной

структуре, генерируя события в моменты времени, определяемые параметрами объектов. По результатам моделирования собирается статистика – производительность за промежуток времени, время использования оборудования, заполненность накопителей и другие показатели. Технологические операции можно создавать как иерархически, так и в виде списка, а также с отображением редактируемого сетевого графика планирования работ.

Объекты, представляющие ресурсы, соединяются между собой стрелками, определяющими направление материалопотоков. Каждый объект в модели автоматически осуществляет сбор статистики своей работы – время работы, количество и типы обслуженных объектов. Для визуализации этих значений применяется инструмент «Анализатор узких мест», позволяющий автоматически собрать статистику и найти наиболее/наименее загруженные участки. Еще одной возможностью является автоматическое построение диаграмм за определенное время по результатам работы.

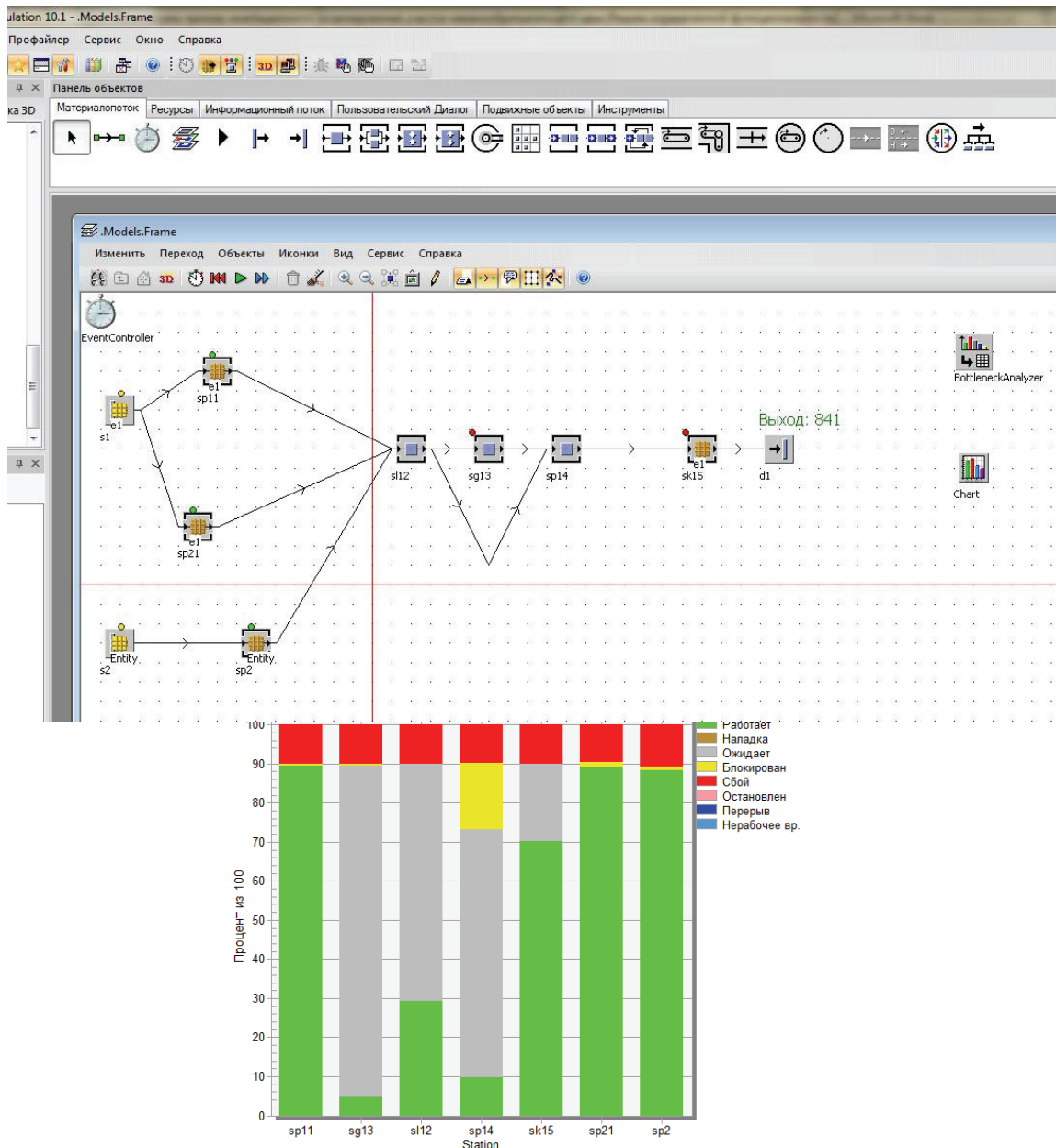
Далее рассмотрен пример создания производственного участка в Tecnomatix Plant Simulation и определены характеристики системы после симуляции. На современном участке цеха необходимо выполнить заказ на изготовление двух типов деталей, дана годовая производственная программа изделий, трудоемкость, перечень вводимого оборудования.

На данном этапе стояла задача смоделировать только процесс механообработки на выбранных станках. Необходимо провести анализ загрузки нового оборудования, который позволит сделать вывод о целесообразности включения данного парка станков в технологический процесс.

Согласно ТП изготовления деталей в имитационную производственную модель необходимо включить следующее оборудование: верстак (слесарная обработка), обрабатывающий центр DMS-60FD, копировально-фрезерный станок (гравирование), ванна (промывка), DeaGlobal (контроль).

На рис.3 изображена модель участка: s1- входной поток (склад заготовок деталей 1 типа), s2 – детали 2 типа, sp11, 21- обработка на Index G160, sp2 – операция обработки на DMS60FD, sl12- слесарная обработка, sg13- гравирование, sm14- промывка (мочная машина), sk15- контрольная операция, d1- выходной поток (склад готовой продукции).

Из графика загрузки оборудования видно, что в элементах моделях sp14, sg13, sp21, sp2 происходит блокировка - деталь находится на станке, но не обрабатывается, а ждет перемещения на следующий элемент, поскольку он занят обработ-



**Рис. 3.** Моделирование производственного процесса изготовления двух типов деталей и график загрузки оборудования

кой другой детали. Для исключения этого добавили Buffer в места, где возможна задержка изделий. Емкость накопителей изначально была 10 деталей. Время моделирования 30 дней (рис. 4). Модель имеет накопители для деталей, ожидающих этап обработки. При обработке деталей учитывалась их приоритетность по срочности. Приоритет задавался деталям первого типа в виде целого числа.

Очереди деталей реализованы с помощью массива очереди –  $H_e = [h_{e1}(i, 575), h_{e2}(j, 274)]$  из элементов: номер детали; количество деталей; приоритет; номер следующей операции из матрицы W.

Объектам класса «оборудование» установили следующие свойства: номер обрабатываемой детали; время завершения текущей опе-

рации; полное время работы станка; время наладки и отказов.

Таким образом, модель позволяет каждый день иметь информацию о том, на каком оборудовании какая деталь обрабатывается, о простоях и переналадке станков за период выполнения заказа по производству текущих видов деталей.

При запуске программы получили, что выпуск годовой производственной программы данных наименований деталей закончится к 22.02 (начало симуляции 01.01). Для оптимизации емкости накопителей без потери производительности производственной системы воспользовались Experiment Manager. В результате работы Experiment Manager было выявлено, что средняя пропускная способность достигается при емкости накопителей, равной 3 детали.

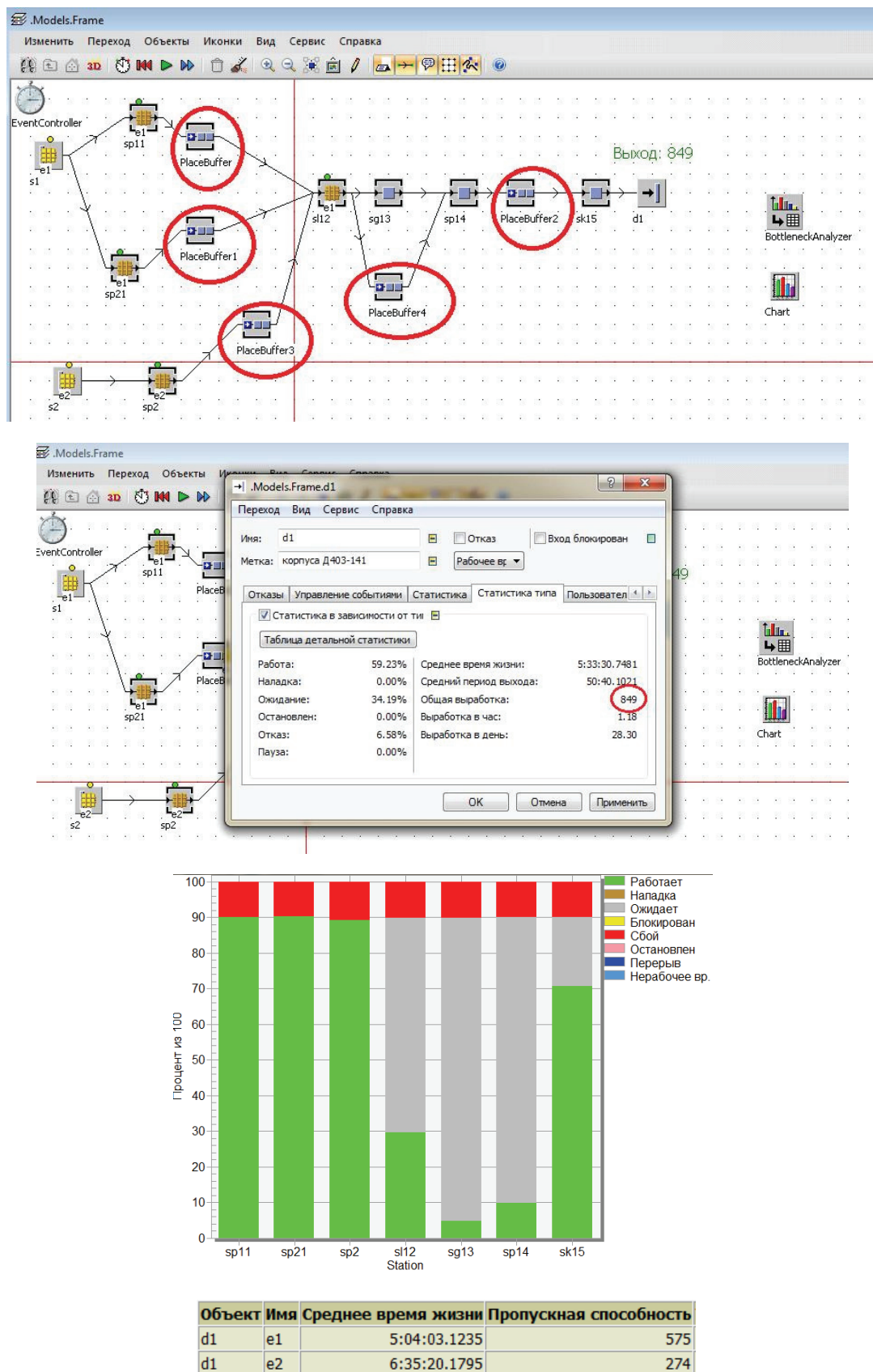


Рис. 4. Моделирование производственного процесса изготовления двух типов деталей с использованием Buffer

Как видно, выработка составила 849 деталей, производительность с первоначальным вариантом проектирования ТП увеличилась на 25%. Кроме этого, мы добились отсутствия блокировки

оборудования, догрузили слесарный станок (на 10%), промывочную ванну (на 5%) и операцию контроль (на 25%) деталями второго типа. Пропускная способность деталей 1 типа составила 575

детали, соответственно, пропускная способность деталей 2 типа 274 деталей за месяц работы.

Созданная имитационная модель позволила определить производительность вводимого в производственную среду оборудования, проанализировать и оптимизировать его загрузку. Кроме этого, проведен анализ критического пути,

выявлены и устранены «узкие» места» рассматриваемой производственной системы.

С помощью средств имитационного моделирования можно обеспечить производственный участок/цех заданной производительностью, оптимизировать движение материального потока и загрузку рабочих мест производственного участка.

## **SIMULATION OF MACHINE WORKSHOP MANUFACTURING SYSTEMS**

© 2013 N.D. Pronichev, V.G. Smelov, V.V. Kokareva, A.N. Malyhin

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

In this article we described the simulation methods to optimize the production system. We analyzed the workflow for specified productivity, optimized material flow and loading working places, found the optimal sizing of work-in-process buffers.

Key words: simulation, production environment, optimization, “bottleneck” place, machine work load

---

*Nikolay Pronichev, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Engines Production Department. E-mail: pdla\_smelov@mail.ru*  
*Vitaly Smelov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Engines Production Department, Head at the Laboratory of Additive Technology. E-mail: pdla\_smelov@mail.ru*  
*Victoria Kokareva, Graduate Student, Engineer at the Aircraft Engines Production Department. E-mail: charming\_carrot@mail.ru*  
*Andrey Malihin, Magister at the Aircraft Engines Production Department E-mail: 19891104@bk.ru*