

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ TЕСNOMATIХPLANTSIMULATON**

Электронные методические указания к лабораторной работе

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование  
образовательной деятельности» Программы развития СГАУ  
на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ  
по специальности 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей и  
направлению подготовки бакалавров 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов со  
сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и  
прогрессивных технологий лекционных заданий»

Соглашение № 1/4 от 03.06. 2013 г.

САМАРА 2013

УДК 658.5 (075)

ББК 32.81я7

И524

Авторы-составители: **Рамзаева Елена Анатольевна,**

**Смелов Виталий Геннадьевич,**

**Кокарева Виктория Валерьевна**

Рецензент: Скуратов Д. Л., д-р техн. наук, профессор

Компьютерная верстка Н.В. Николаева

**Имитационное моделирование производственных систем предприятия TecnomatixPlantSimulaton** [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Е.А. Рамзаева, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева. - Электрон. текстовые и граф. дан. (4,6 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В методических указаниях приводится методика, позволяющая построить имитационную модель производственных процессов на участке механообрабатывающего цеха. Визуально показана взаимосвязь загрузки оборудования с распределением потоков деталей между оборудованием на виртуальном участке механической обработки.

Методические указания предназначены для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов»: бакалавров специальности 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов (ФГОС-3), изучающих дисциплины: «Организация машиностроительного производства и его организационно-экономическое моделирование» (8 семестр), «Информационные технологии в механообрабатывающем производстве» (6 семестр), «Проектирование производственных систем» (8 семестр) и специалистов направления 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей (ФГОС–3), изучающих дисциплины: «Технологическая подготовка современного производства» (9 семестр), «Инновационные производственные технологии в двигателестроении» (9 и А семестр).

Подготовлено на кафедре производства двигателей летательных аппаратов

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Имитационное моделирование производственных систем .....	5
1.1 Методы и средства имитационного моделирования производственных систем .....	10
1.2 Имитационная модель участка производства .....	19
2 Имитационное моделирование в системе Tecnomatix Plant Simulaton.....	26
2.1 Работа в программе PLANT SIMULATION .....	30
Список использованных источников .....	51

## **Цель и задачи работы**

Целью данной лабораторной работы является развитие теоретических и практических навыков создания имитационной модели виртуального предприятия на базе механообрабатывающего цеха с помощью Tecnomatix Plant Simulation.

Tecnomatix Plant Simulation представляет собой инструмент дискретного имитационного моделирования, который позволяет создавать цифровые модели логических систем (например, производства) для определения характеристик системы и оптимизации ее производительности. Созданные цифровые модели позволяют проводить эксперименты и прорабатывать сценарии «что если», данная программа имеет большой набор аналитических инструментов (анализ узких мест, статистические данные и графики) и помогает оценить различные сценарии производства. Полученная в результате этого информация необходима для быстрого принятия верных решений на ранних стадиях планирования производства.

### **Задачи работы:**

Изучить принципы работы пользователей в системе Tecnomatix Plant Simulation при построении модели производственных процессов.

1. Создать модель данных в системы Tecnomatix Plant Simulation.
2. Создать атрибутивную информацию для объектов модели;
3. Провести симуляцию;
4. Провести анализ полученных данных.

## 1 Имитационное моделирование производственных систем

На сегодняшний день именно метод имитационного моделирования является одним из самых мощных и наиболее эффективных методов исследования процессов и производственных систем. Имитационная модель должна отражать большое число параметров, логику и закономерности поведения моделируемого объекта.

Прежде чем перейти к рассмотрению имитационного моделирования, рассмотрим все *существующие виды моделирования систем*. Существуют следующие виды моделирования систем — аналитическое, имитационное и экспериментальное.

**Аналитическая модель** базируется на математическом описании объекта. В аналитической модели приходится идти на существенные упрощения и допущения, что может привести к получению приближенных и даже недостоверных результатов. Зачастую решение представляется в виде преобразования Лапласа, или в виде системы сложных интегро-дифференциальных уравнений. Следует отметить, что в последние годы возможности исследования аналитических моделей значительно возросли благодаря бурному развитию и внедрению методов вычислительной математики с численным решением на ЭВМ. Важным преимуществом аналитических моделей в целом является возможность быстрого с минимальными затратами получения значений параметров исследуемого объекта. При построении и применении аналитических моделей важно выбрать лишь существенные параметры и отбросить параметры, мало влияющие на качество функционирования объекта (системы). Для этого необходимо хорошо представлять физическую сущность процессов, поведения объекта, чтобы понять, какие упрощающие предположения и допущения мало скажутся на конечных результатах.

Во многих случаях требуется более детальная информация о поведении объекта, системы. В этом случае используют **имитационное моделирование**, с помощью которого описывается функционирование системы в виде последовательности операций на ЭВМ. Поведение системы представляется в виде алгоритма, на основе которого разрабатывается программа для ЭВМ. Сущность имитационного моделирования состоит в том, что процесс имитируется с помощью арифметических и логических операций в последовательности, соответствующей моделируемому процессу.

**Экспериментальные модели** исторически использовались одними из первых при проведении испытаний, исследовании сложных систем. Они дают наиболее полную и достоверную информацию об исследуемом объекте. В ряде отраслей экспериментальное моделирование является доминирующим при разработке объекта. Например, обязательным этапом разработки новой конструкции самолета является проведение испытаний его модели в аэродинамической трубе. По существу, целые этапы разработки многих видов аппаратуры, комплексов, систем имеют своей конечной целью проведение экспериментов, испытаний разработок при соответствующих условиях эксплуатации. Лишь на основе практики, проведения испытаний можно окончательно судить о качестве разработанного объекта.

Имитационное моделирование позволяет воспроизводить процесс функционирования системы во времени с сохранением элементарных явлений, их логической структуры и последовательности протекания во времени. Это позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в будущем в определенные моменты времени. В настоящее время имитационный метод является наиболее эффективным, а зачастую, и единственным методом исследования сложных систем на этапе их проектирования.

**Имитационная модель** является динамической моделью, в которой все процессы рассматриваются в неубывающем масштабе времени. В описании имитационной модели выделяют две составляющие:

- Статическое описание системы, которое по существу является описанием ее структуры. При разработке имитационной модели необходимо выполнять структурный анализ моделируемых процессов.

- Динамическое описание системы, или описание динамики взаимодействий ее элементов. При его составлении фактически требуется построение функциональной модели моделируемых динамических процессов.

Отличительной особенностью метода имитационного моделирования является возможность описания и воспроизведения взаимодействия между различными элементами системы. Таким образом, чтобы составить имитационную модель, надо: представить реальную систему (процесс), как совокупность взаимодействующих элементов; алгоритмически описать функционирование отдельных элементов; описать процесс взаимодействия различных элементов между собой и с внешней средой.

Основным моментом в имитационном моделировании является выделение и описание состояний системы. Система характеризуется набором переменных состояний, каждая комбинация которых описывает конкретное состояние. Следовательно, путем изменения значений этих переменных можно имитировать переход системы из одного состояния в другое. Таким образом, имитационное моделирование – это представление динамического поведения системы посредством продвижения ее от одного состояния к другому в соответствии с

хорошо определенными операционными правилами. Эти изменения состояний могут происходить либо непрерывно, либо в дискретные моменты времени. Имитационное моделирование – есть динамическое отражение изменений состояния системы с течением времени.

Основной подход для создания имитационной модели на ЭВМ заключается в формировании на ЭВМ случайных величин и функций и многократного их воспроизведения в соответствии с закономерностями моделируемого процесса. В результате последующей статистической обработки получаемых частных результатов получают итоговые результаты, характеризующие процесс функционирования системы. Машинный вариант имитационного моделирования называется методом статистического моделирования. В упрощенном виде метод статистического моделирования был известен задолго до появления ЭВМ как метод Монте-Карло, основанный на ручном получении случайных чисел, наподобие рулетки игрового автомат.

Рассмотрим такой *пример*, в парк станков поступают разнородные заготовки, требующие разного времени обработки в зависимости от типа изготавливаемой детали, требуемых приспособлений, квалификации рабочего. Поток поступающих заготовок случаен во времени и может изменяться в течение рабочего дня (так называемый случайный поток с изменяющимися параметрами). Отдельные станки могут на время выходить из строя. Неизбежны также случаи прерывания работы. Кроме того, одна заготовка может проходить последовательную обработку на разных станках, т. е. в этом случае необходимо найти рациональные режимы группы взаимосвязанных станков. Аналитическое решение по оптимизации работы станочного парка с целью обеспечения максимальной загрузки станков и получения максимальной общей производительности, как правило, в таких ситуациях невозможно. Аналитические решения в основном применяются



лишь в простейших случаях при последовательной обработке одного типа детали при постоянном времени ее обработки на каждом станке. Данная задача относится к задачам массового обслуживания в машиностроении. Имитационные модели позволяют учитывать такие факторы, как нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и другие, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. Используя результаты имитационного моделирования, можно описать поведение системы, оценить влияние различных параметров системы на ее характеристики, выявить преимущества и недостатки предлагаемых изменений, прогнозировать поведение системы.

Любой производственный процесс состоит из отдельных, но взаимосвязанных определенной последовательностью элементов: задел, рабочее место, операция на рабочем месте, поток. Используя эти элементы, их параметры и устанавливая связи между ними, возможно спроектировать модели процессов различной сложности. Удобнее всего заменить каждый элемент графическим образом и использовать блок-схему при построении имитационной модели. Графические элементы имитационной модели являются динамическими, поскольку все их параметры — координаты, размер, цвет и даже их видимость — в процессе функционирования модели можно сделать зависимыми от переменных и параметров, которые меняются со временем.

После построения имитационной модели при проведении оптимизации модели можно подобрать количество оборудования и рабочих мест для выполнения всех операций производственного процесса, определить величину транспортной партии при передаче изделий между различными рабочими местами и начальные значения межоперационных заделов.

## **1.1 Методы и средства имитационного моделирования производственных систем**

Имитационное моделирование (ИМ) началось с использования универсальных языков программирования и статистических испытаний (метод Монте-Карло) в середине 60-х гг. XX в. В 1961 г. появился специализированный язык ИМ - GPSS. В середине 90-х гг. XX в. началось развитие универсальных и специализированных сред ИМ, обусловленное быстрым развитием персональных ЭВМ. Новое поколение сред ИМ (Arena, Extend и др.) позволило разрабатывать и проводить имитационные эксперименты без знания специализированных языков. К концу 90-х гг. XX в. были разработаны специализированные среды имитационного моделирования, отличающиеся от универсальных сред наличием библиотек и шаблонов элементов производственных систем. К 2000 г. было создано более 50 сред ИМ.

Существует **четыре основных подхода ИМ**: динамическое моделирование, системная динамика (СД), дискретно-событийный (ДС) и агентное моделирование. Также следует отметить метод статистических испытаний - метод Монте-Карло (МК).

Динамические системы (механические или физические процессы, системы управления) описываются алгебраическими уравнениями, дифференциальными уравнениями и блок-схемами.

**Системно-динамический подход** представляет собой мощный инструментальный для исследования динамических процессов, направленный на изучение сложных систем с обратной связью (производственные, социально-экономические и др.). Процессы представляются в виде диаграммы, состоящей из петель положительной и отрицательной обратной связи. Главное внимание уделяется моделированию обратных связей. Результатом моделирования СД-модели является выявление глобальных

зависимостей и причинно-следственных связей в исследуемой системе. Системно-динамические модели обычно задаются в виде потоковых диаграмм (рисунок 1), состоящих из накопителей, потоков между ними, петель обратной связи и вспомогательных переменных, которые затем транслируются в систему алгебро-дифференциальных уравнений.

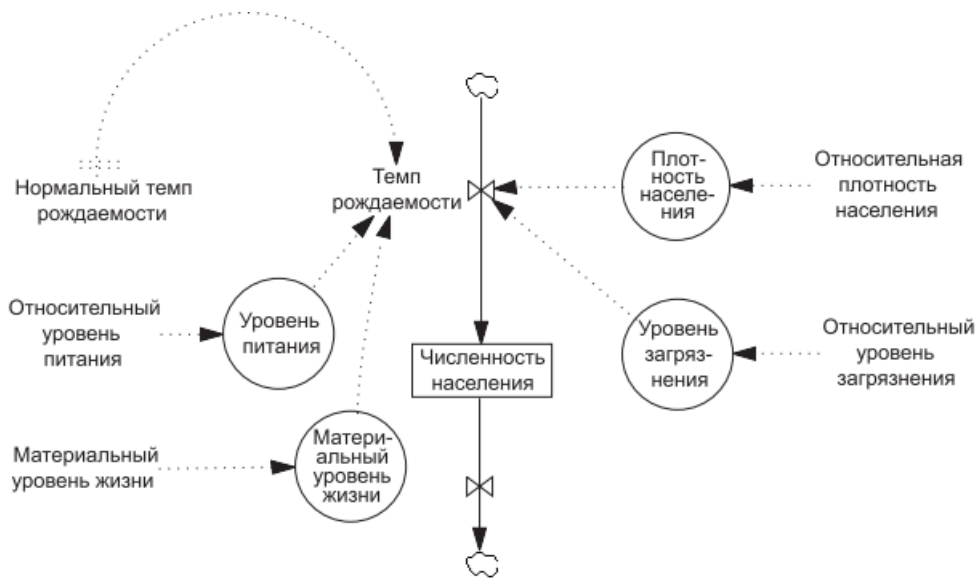


Рисунок 1 – Пример потоковой диаграммы

**Дискретно-событийный подход** разработан в начале 60-х гг. XX в. Дж. Гордоном. Он спроектировал и реализовал на мэйнфреймах IBM систему GPSS. Основной объект в этой системе — пассивный транзакт (заявка на обслуживание), который может определенным образом представлять собой

работников, детали, сырье, документы, сигналы и т. п. «Перемещаясь» по модели, транзакты становятся в очереди к одноканальным и многоканальным устройствам, захватывают и освобождают эти устройства, расщепляются, уничтожаются и т. д. В отличие от СД модельное время продвигается либо от события к событию (событийно-ориентирован), либо через дискретные промежутки времени (процессно-ориентирован). Дискретно-событийный подход применяется в случае, если можно считать, что переменные системы изменяются мгновенно в определенные моменты времени. Для представления ДС-моделей применяется методология событийного графа. Дискретно-событийное моделирование - наиболее распространенный подход ИМ, сфера его применения очень обширна: логистика, социально-экономические процессы, промышленность и др. Описываются дискретно-событийные модели в виде блоков, обрабатывающих заявки в соответствии с заданными параметрами, и соединений между ними, определяющих последовательность операций (рисунок 2).

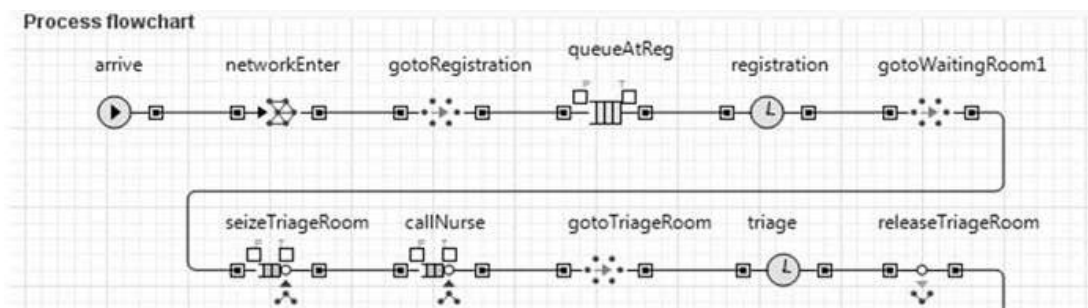


Рисунок 2 – Пример процессной диаграммы

Развитие идей **агентного моделирования** началось в 70-х гг. XX в., но как парадигма подход сформировался в 90-х гг. XX в. Основой агентного моделирования является понятие "агент" - некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, которая может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться. Ключевыми элементами агентного моделирования являются карты состояний. Агентное

моделирование применяется для имитации интеллектуальных, децентрализованных и распределенных систем с целью получения сведений о влиянии на систему функционирования и взаимодействия элементов.

**Метод Монте-Карло** - численный метод решения математических задач с помощью моделирования случайных величин, разработанный в 1949 г. Дж. Нейманом и С. Улама. Метод статистических испытаний позволяет моделировать любой процесс, на протекание которого оказывают влияние случайные факторы. Метод используется во многих областях науки (математике, физике и др.). Сущностью метода Монте-Карло является применение какого-либо генератора равномерно распределенных случайных чисел в связи с функцией распределения вероятностей изучаемого процесса. После определения функции на основе теоретического, эмпирического или другого распределения, соответствующего характеру изучаемого процесса, производятся случайные выборки, представляющие значения входных данных. С помощью множественных прогонов имитационной модели получается соответствие множеств значений входных и выходных параметров. На заключительном этапе осуществляется принятие решений с помощью статистического анализа выходных данных.

Мы видим, что для моделирования производства и бизнес-процессов достаточно применить только дискретно-событийное моделирование. Но, так как выбор метода моделирования зависит от решаемой задачи и целей, следует в некоторых случаях рассматривать многоподходное моделирование. Например, если производство зависит от спроса, то необходимо моделировать рынок, где дискретно-событийный метод не работает, и нужно использовать системную динамику или агентное моделирование. Или другой пример: моделирование динамики населения страны, с детальным моделированием одного из регионов с учетом этнических групп, семей, уровня образования и т.д. Глобальную динамику

можно здесь можно моделировать, используя системно-динамический подход, но, чтобы «опуститься» до уровня семей, социальной среды, климатических условий, нужно использовать агентное моделирование.

После выбора подхода ИМ производится разработка имитационной модели. Данный процесс включает следующие этапы, см. рисунок 3.



Рисунок 3 – Технологическая схема имитационного моделирования

**Основные этапы составления имитационной модели** приведены ниже:

1. Точная формулировка цели исследования и сбор информации и данных.

2. Разработка концептуальной модели и проверка ее на адекватность поставленной задаче и выполнение структурного критического анализа (концептуальная модель и способ формализации).

3. Перевод концептуальной модели с помощью программных средств в машинное представление (программирование имитационной модели – имитационная модель).

4. Верификация<sup>1</sup> запрограммированной модели. На этом этапе выполняются анализ чувствительности и валидация<sup>2</sup> выходных данных

<sup>1</sup> Верификация – процесс контроля корректности трансляции концептуальной модели в имитационную программу

имитационной модели (если реальная система существует, для сравнения выходных данных модели и реальной системы применяются статистические методы).

5. Разработка, выполнение и анализ экспериментов (план и условия имитационного эксперимента).

6. Документирование и представление полученных результатов.

Результатом работ на первого этапа является **содержательное описание объекта** моделирования с указанием целей имитации и тех аспектов функционирования объекта моделирования, которые необходимо изучить на имитационной модели.

В ходе составления содержательного описания объекта моделирования устанавливаются границы изучения моделируемого объекта, дается описание внешней среды, с которой он взаимодействует. Формулируются также основные критерии эффективности, по которым предполагается проводить сравнение на модели различных вариантов решений, проводится генерация и описание рассматриваемых альтернатив. Общие принципы действия на этом этапе: сбор данных об объекте моделирования и составление содержательного описания объекта моделирования; изучение проблемной ситуации – уточнение целей моделирования; обосновывается необходимость моделирования и осуществляется выбор метода моделирования.

Стоит помнить, что анализ проблемы необходимо начинать с детального изучения всех аспектов функционирования. Необходимо рассматривать данный вопрос с точки зрения системного подхода.

---

<sup>2</sup> *Валидация* – процесс проверки, является ли модель допустимым представлением реальной системы, основываясь на целевой направленности модели

При разработке **концептуальной модели** осуществляется установление основной структуры модели, которое включает статическое и динамическое описание системы. Определяются границы системы, приводится описание внешней среды, выделяются существенные элементы и дается их описание, формируются переменные, параметры, функциональные зависимости как для отдельных элементов и процессов, так и для всей системы, ограничения, целевые функции (критерии).

На этом этапе осуществляется **декомпозиция системы**. Определяются наиболее существенные в смысле сформулированной проблемы элементы системы (выполняется структурный анализ моделируемой системы) и взаимодействия между ними, выявляются основные аспекты функционирования моделируемой систем (составляется функциональная модель), приводится описание внешней среды. Декомпозиция системы (объекта моделирования) или выделение подсистем – есть операция анализа. Важно определить, какие компоненты будут включены в модель, какие будут вынесены во внешнюю среду, и какие взаимосвязи будут установлены между ними.

Каждая модель представляет собой некоторую комбинацию таких составляющих, как компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции (критерии).

Под компонентами понимают составные части, которые при соответствующем объединении образуют систему.

Параметрами являются величины, которые исследователь может выбирать произвольно, в отличие от переменных модели, которые могут принимать только значения, определяемые видом данной функции.

В модели будем различать переменные двух видов: экзогенные и эндогенные. Экзогенные переменные называются также входными. Это



означает, что они порождаются вне системы или являются результатом взаимодействия внешних причин. Эндогенными переменными называются переменные, возникающие в системе в результате воздействия внутренних причин. Когда же необходимо описать входы и выходы системы, мы имеем дело с входными и выходными переменными.

Теперь непосредственно перейдем к рассмотрению имитационной модели производственной системы. Как пример, рассмотрим деятельность участка цеха, оснащенного механообрабатывающими центрами. Блочно-ориентированная концепция структуризации моделируемого процесса основывается на описании систем массового обслуживания (СМО). Структура моделируемого процесса изображается в виде потока, проходящего через обслуживающие устройства (ОУ) - обрабатывающий центр, очереди, ключи и другие элементы СМО. Модель имеет блочную структуру (рисунок 4). Моделируемый процесс представляется как поток заявок – деталей (заготовок) в системе обслуживания. Детали (транзакты) конкурируют между собой за место в ОУ, образуют очереди перед ОУ, если они заняты. Дуги на блок-схеме – потенциальные потоки деталей между ОУ. Существуют истоки и стоки этих транзактов. В этом случае блок-схема модели описывает маршруты движения деталей в системе.



Рисунок 4 – Структура систем массового обслуживания

Основной параметр потока деталей – промежуток времени между моментами поступления 2-х соседних заявок (деталей). Поток заявок

рассматривается как случайный процесс, характеризующийся функцией распределения периода поступления заявок (например, простейший поток, поток Эрланга).

Элемент системы, в котором происходят операции, называется обслуживающим устройством, в данном случае это обрабатывающий центр. В момент выполнения операций он занят, иначе – свободен. Если ОУ (канал) свободен, то заготовка/деталь принимается к обслуживанию. Обслуживание каждой заявки каналом означает задержку в нем детали на время, равное периоду обслуживания. После обслуживания деталь покидает обрабатывающий центр. Таким образом, ОУ характеризуется *временем обслуживания детали* (время обработки детали).

При случайном характере поступления деталей образуются очереди. Заявки (заготовки/детали) принимаются к обслуживанию:

- в порядке очереди (FIFO, очереди с приоритетами и др.),
- в случайном порядке в соответствии с заданными распределениями, по минимальному времени получения отказа.

В системе происходят такие события, как: поступление заготовок; постановка заготовок в очередь; начало обработки; конец обработки и др.

**Транзакты** (заготовки/детали) перемещаются между обрабатывающими центрами и другим оборудованием цеха в соответствии с логикой моделирования, транзакты вызывают (и испытывают) различные действия: возможны их задержки в некоторых точках модели (связанные с обработкой, ожиданием в очереди); изменение маршрутов и направления движения.

Зачастую при генерации транзактов резервируются некоторые параметров: № транзакта; № блока, в котором транзакт находится в данный

момент; № следующего блока; время перехода в следующий блок; приоритет, характеризующий очередность обработки транзактов в определенных ситуациях; и др.

## **1.2 Имитационная модель участка производства**

При проведении модельных экспериментов возможно 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.

При поломке оборудования или отсутствии работника, партии деталей распределяются между оставшимися единицами оборудования внутри данной группы или, при отсутствии резервного оборудования могут быть переданы для выполнения выносных операций на оборудовании за пределами данного участка производства.

Для моделирования деятельности участка 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;

$T_k=||t_k(i,j)||$  - время проведения контрольных операций по видам деталей  $i$  и видам оборудования  $j$ ;

$T_d=||t_d(i,j)||$  - время осуществления транспортных операций.

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

В общем случае входные и результирующие данные для построения имитационной модели можно представить в виде схем (рисунок 5,6).

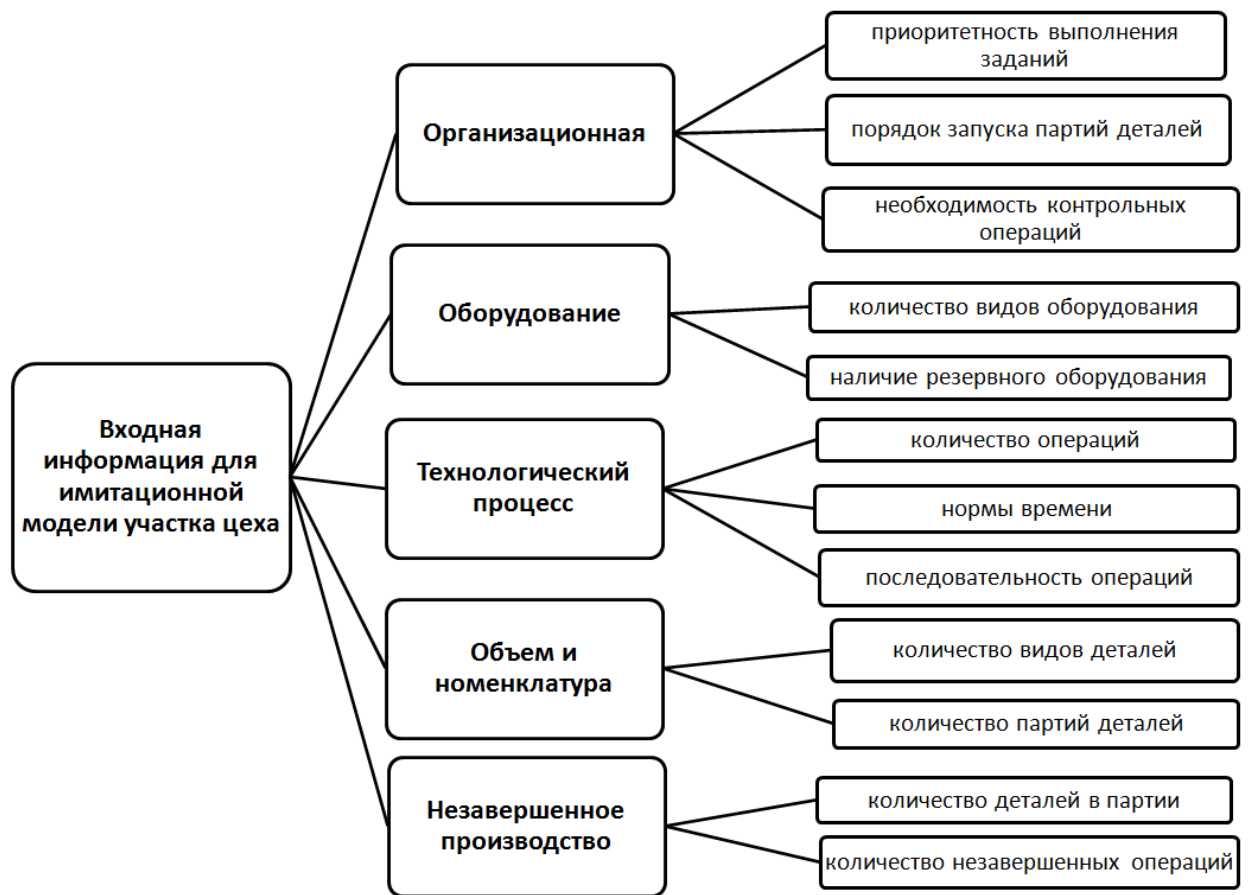


Рисунок 5 - Входная информация для имитационной модели



## Рисунок 6 - Результирующие данные для построения имитационной модели

В результате проводимых на модели экспериментов оцениваются **значения организационно-технических характеристик** производственной системы, динамика загрузки оборудования и работников, длительность производственного цикла, величина незавершенного производства, время проведения и количество персонала, необходимого для осуществления контрольных операций в зависимости от вариации производственной программы выпуска изделий, структурных изменений производственной системы, порядка запуска изделий в производства, величины 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 парирования возникших отклонений и сбоев в ходе производства путем перераспределения ресурсов, изменения порядка запуска-выпуска предметов труда, но и прогнозировать напряженные и аварийные ситуации.

В имитационной модели осуществляется анализ происходящих событий. Например, при наступлении очередного события в модели происходит появление новых объектов (например, партии деталей), изменение параметров объектов (например, состояние оборудования – “свободно” или “занято”, “работоспособное” или “отказ”), начало или окончание некоторого действия над объектом (например, транспортирование партий деталей), уход объекта из системы, завершение работы модели при наступлении события конца моделируемого периода.

При анализе события в имитационной модели осуществляется прогнозирование времени наступления события, инициируемого данным. Например, если наступило событие занятие оборудования партией деталей, то программой моделируется прогноз времени его освобождения и данное событие заносится в список будущих событий модели. После обработки очередного события осуществляется продвижение модельного времени до следующего ближайшего по времени события из списка. Осуществляется распознавание события и его обработка в модели.

Процесс имитации продолжается до наступления события окончания времени моделирования или какого-либо другого признака, например отсутствия в списке очередного события, получения требуемой статистики и т.д.

Укрупненная блок-схема (рисунок 7) алгоритма модели подразделения (цеха, участка) включает следующие блоки:

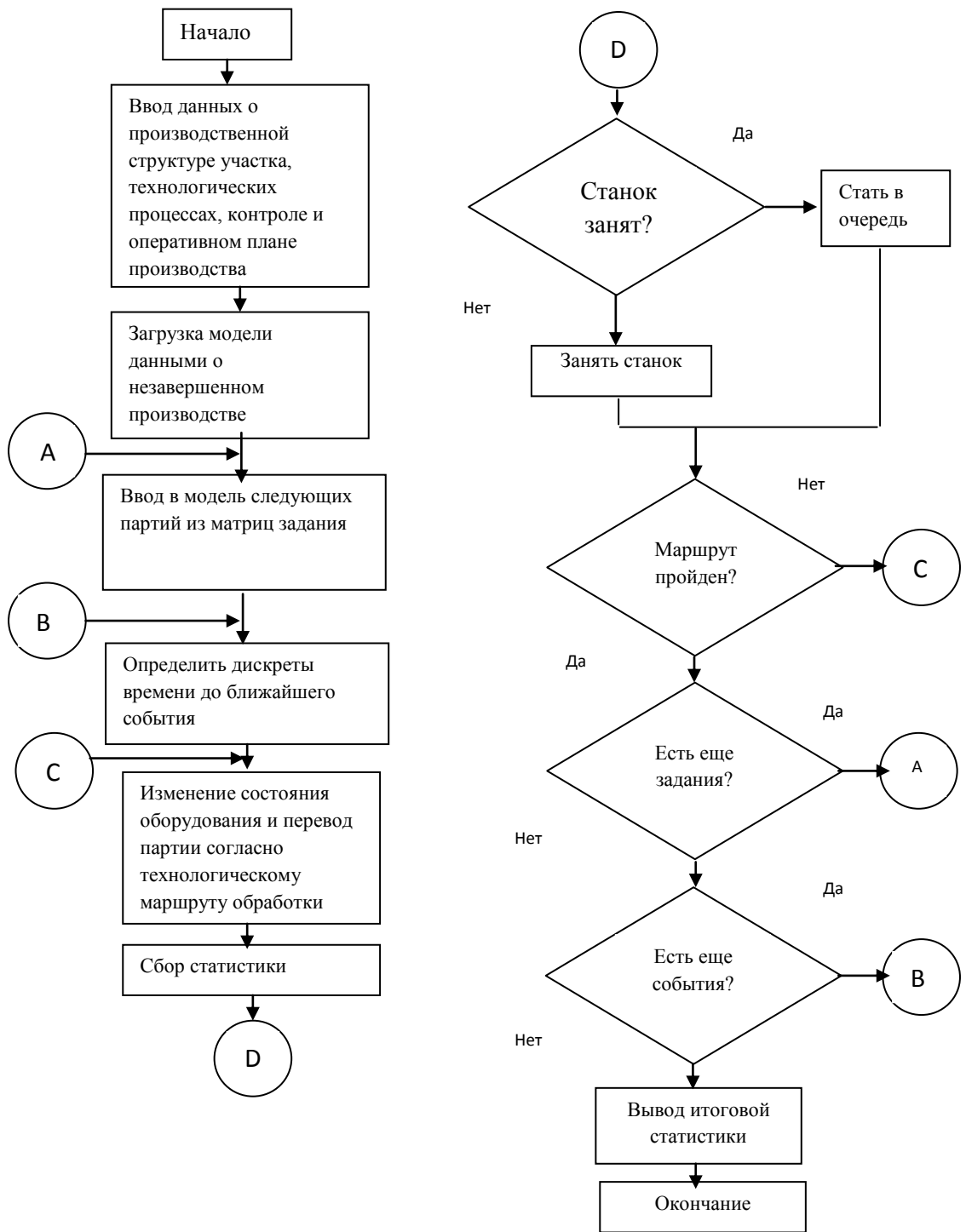


Рисунок 7 - Укрупненная блок-схема алгоритма имитационной модели участка производства



### **Задания для студентов:**

1. Дайте содержательное описание объекта моделирования (описание внешней среды, критерий эффективности);
2. Составьте концептуальную модель (определите функциональные зависимости, параметры, ограничения и составить целевую функцию);
3. Проведите декомпозицию системы;
4. Определите входящие параметры;
5. Определите результирующие данные.

## **2 Имитационное моделирование в системе Tecnomatix Plant Simulaton**

Tecnomatix — это комплексный пакет решений для цифрового производства, объединяющий все области производства и разработки изделия, от схемы производственного процесса и проектирования, моделирования и проверки процессов до производства, основанный на принципах управления жизненным циклом изделия (PLM) производственной платформы. Продуктовая линейка Tecnomatix обеспечивает решение различных производственных задач:

- имитационное моделирование и оптимизация систем и бизнес-процессов (Plant Simulation);
- производство деталей (Tecnomatix Part Manufacturing);
- моделирование роботизированных процессов и offline – программирование промышленных роботов (RobCAD);
- проектирование и оптимизация предприятия (FactoryCAD/FactoryFlow);
- управление производственным процессом (Tecnomatix Manufacturing Process Management).

Plant Simulation – имитационное моделирование систем и процессов, в которых важными факторами являются производительность, ограниченность ресурсов, сбои. Такая модель позволяет без экспериментов в работающем производстве проводить анализ и оптимизацию различных параметров, в том числе:

- размеры накопителей, межоперационных заделов, складских площадей;
- времена циклов работы оборудования;

- график выполнения заказов, порядок запуска их в производство и размеры партий продукции;
- правила управления системой;
- топология и организация материалопотоков.

Рассмотрев несколько вариантов, можно сравнить их по эффективности работы и стоимости, обоснованно предложить оптимальное проектное решение. Кроме того, имитационная модель может быть использована для ядра системы оперативного управления. На основании исходных данных (состояние оборудования, план выпуска продукции, требования по плановому ремонту оборудования и пр.) проигрываются возможные варианты, и выбирается оптимальный график производства по одному или нескольким критериям, например:

- максимальная производительность;
- минимальное отклонение от плана выпуска по времени;
- минимальная себестоимость;
- соблюдение графика исполнения приоритетных заказов.

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 Units** - 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, генерирую события в моменты времени, определяемые параметрами объектов. По результатам моделирования собирается статистика – производительность за промежутки времени, время использования оборудования, заполненность накопителей, другие показатели.

Объекты, представляющие ресурсы, соединяются между собой стрелками, определяющими направление материалопотока.

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.

Целью моделирования является вычисление средней производительности, потребности в промежуточных накопителях, их емкости и влияние соотношения на среднегодовую производительность. Такие параметры, как время работы, вместимость объекта, алгоритм работы накопителей, размеры партий продукта можно менять в диалоговом интерфейсе.

**Plant Simulation** решает 3 основных задачи:

- стратегическое планирование;
- тактическое планирование;
- оперативное планирование.

Стратегическое планирование. Эта задача встает перед проектантами в случае создания новых или модификации существующих производств. Основной целью является оценка функционирования системы на больших временных интервалах и вычисление усредненных показателей. По результатам моделирования принимается решение о типах и количестве единиц оборудования, о правилах организации материалопотоков. Имитационная модель является основой принятия инвестиционных решений и выбора варианта модернизации системы.

Тактическое планирование подразумевает решение таких задач, как оценка текущего состояния производства, заключение о возможности принять к исполнению заказ дополнительно к уже имеющемуся портфелю заказов или оценке сдвигов сроков выпуска заказов.

Оперативное планирование - построение графика производства. Для оперативного планирования требуется получение актуальной информации об оборудовании, о его состоянии и занятости в текущий момент.

## **Выводы**

Моделирование производственных систем позволяет заранее обнаружить и устранить проблемы, которые проявятся на этапе пуско-наладки и потребовали бы финансовых и временных затрат; снизить инвестиции в производство при тех же параметрах производительности; провести оптимизацию производства и выбрать наиболее рациональное решение из множества вариантов.

Визуализация является мощным инструментом моделирования. Она важна не только для представления результатов проекта, но и в ходе работы над моделью, так позволяет наглядно оценить работу, выявить ошибки в модели и проблемные места.

Имитационное моделирование позволяет описать структуру системы и ее процессы в естественном виде, не прибегая к использованию формул и строгих математических зависимостей.

## 2.1 Работа в программе PLANT SIMULATION

Рассмотрим пример имитационного моделирования участка механообрабатывающего цеха. На участке используются обрабатывающие центры: Index G160, DMS-60 FD и др.

1. Начало работы производится запуском программы *Plant Simulation*, и в открывшемся окне создаем новую модель: *Файл – Новая модель*.


2. Выбираем базовые объекты материального потока *Basic Objects*, выбираем все объекты материального потока - *Material Flow*, т.к. они являются необходимыми базовыми элементами для построения схемы. При необходимости для активации объёмных моделей можно расставить соответствующие галочки во вкладке *Библиотека*

3. Создать схему обработки деталей можно с помощью панели инструментов *Toolbox*, используя вкладку *Material Flow*. Или выбрать вкладку *Материалопоток/Инструменты* на *панели объектов* (см. рисунок 8). Для добавления объекта выбираем сам объект, устанавливаем курсор мыши в то положение, в которое необходимо вставить данные элементы.

4. В модель добавляем следующие элементы (панель слева рабочего экрана или вкладка *Материалопоток*): *Source*, *Drain* - входной

поток грузов, товаров, пассажиров или транспортных средств, поток заявок на выполнение транспортных операций и граничный объект в структуре, через который динамические объекты покидают модель, соответственно. *Single Proc* – технологические операции.

5. Установим связи между объектами: *Connector* (вкладка *Material Flow/Материалопоток*). Нажав *Ctrl*, щелчком левой кнопки мыши устанавливаем связи от элемента к элементу.

6. Для учета времени работы добавим в схему *Event Controller* (вкладка *Material Flow/Материалопоток*). Эта функция позволяет координировать все события при работе схемы:  (рисунок 9). В настройках нужно указать время симуляции (месяц).

Согласно технологическому процессу изготовления детали «Корпус» Д 403-141 в имитационную производственную модель включили следующее оборудование: верстак (слесарная обработка), копировально-фрезерный станок (гравирование), ванна (промывка), DeaGlobal (контроль) - *sp*.

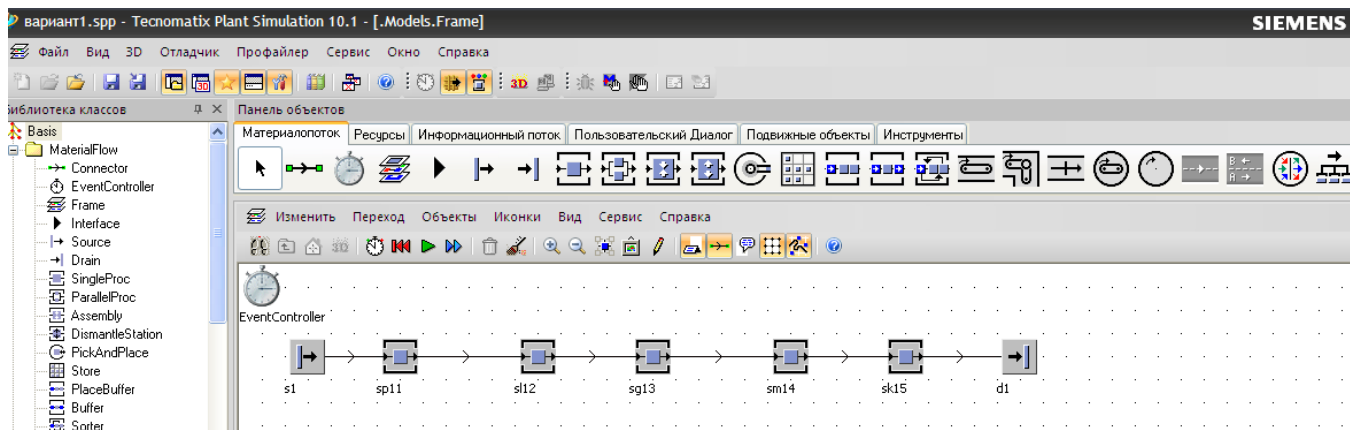


Рисунок 8 – Пример модели: sp11- обработка на index g160, sl12- слесарная обработка, sg13- гравирование, sm14- промывка (мочная машина), sk15- контрольная операция, s1- входной поток (склад заготовок), d1- выходной поток (склад готовой продукции)

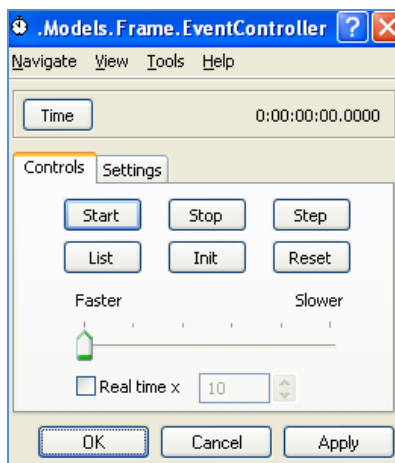


Рисунок 9 – Окно Event Controller

7. Для учета времени работы в модель добавляем *ChiftCalendar* (вкладка *Ресурсы/Resources*). Заполняем данное окно, режим работы двусменный при пятидневной рабочей неделе.

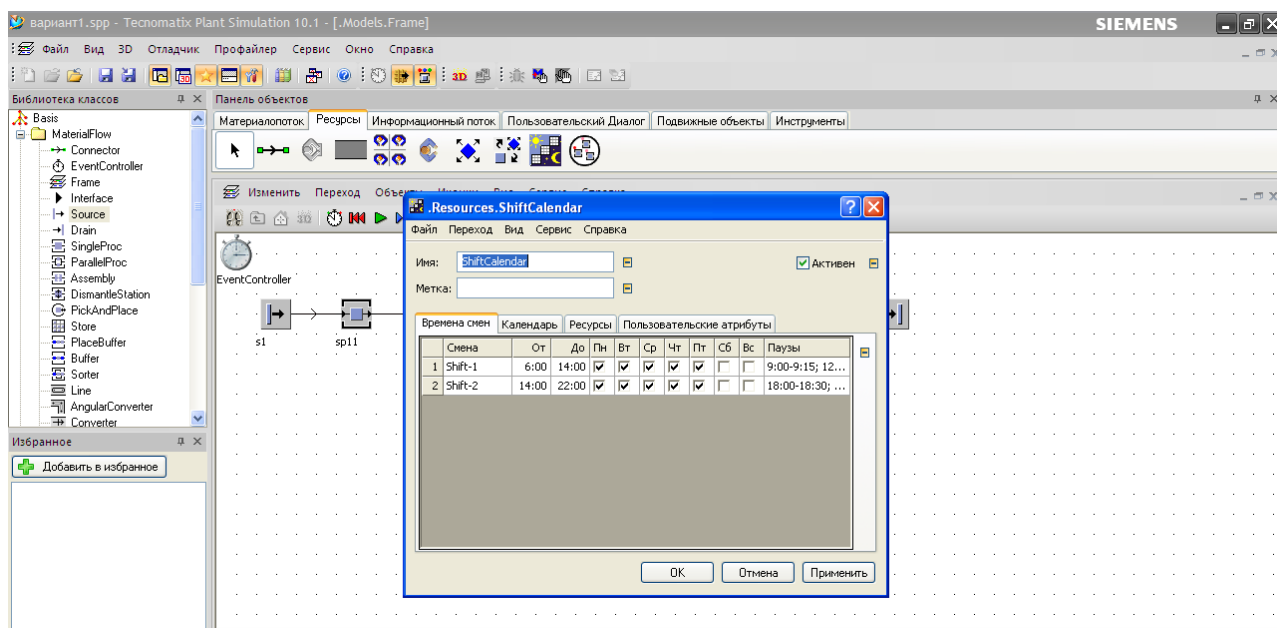


Рисунок 10 – Окно ChiftCalendar

8. В диалоговом окне *ProgSingle* (операции ТП изготовления детали «Корпус») во вкладке *Времена* добавляем время обработки и подготовительно-заключительное время (рисунок 11).



9. В диалоговом окне *ProgSingle* во вкладке *Переналадка* ставим галочку *Автоматически*, для автоматической передачи партий деталей между станками. Принимаем партию деталей  $n = 20$  штук, такой размер партии принят на заводе. Ставим галочку *После 20 деталей*, т.е. детали будут передаваться между станками по одной партии.

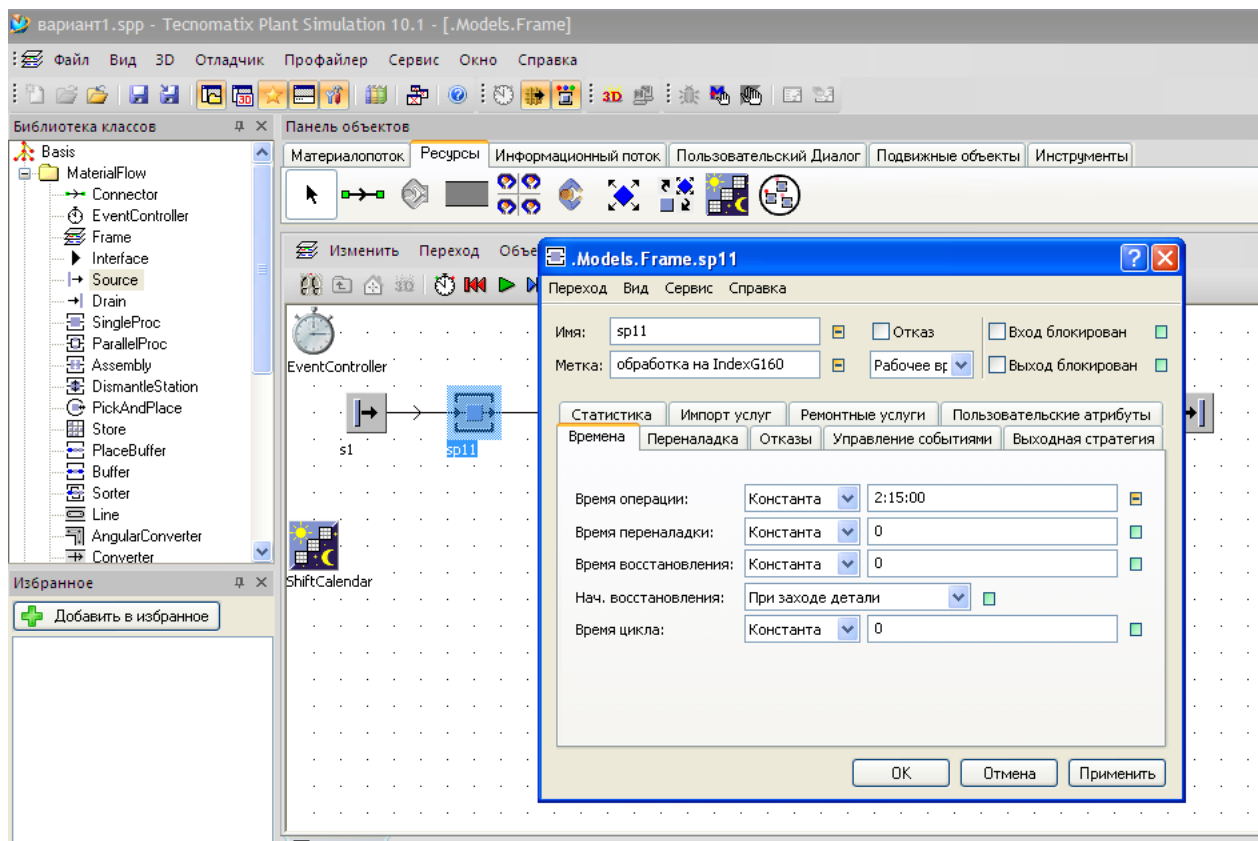


Рисунок 11 – Пример заполнения вкладки Времена

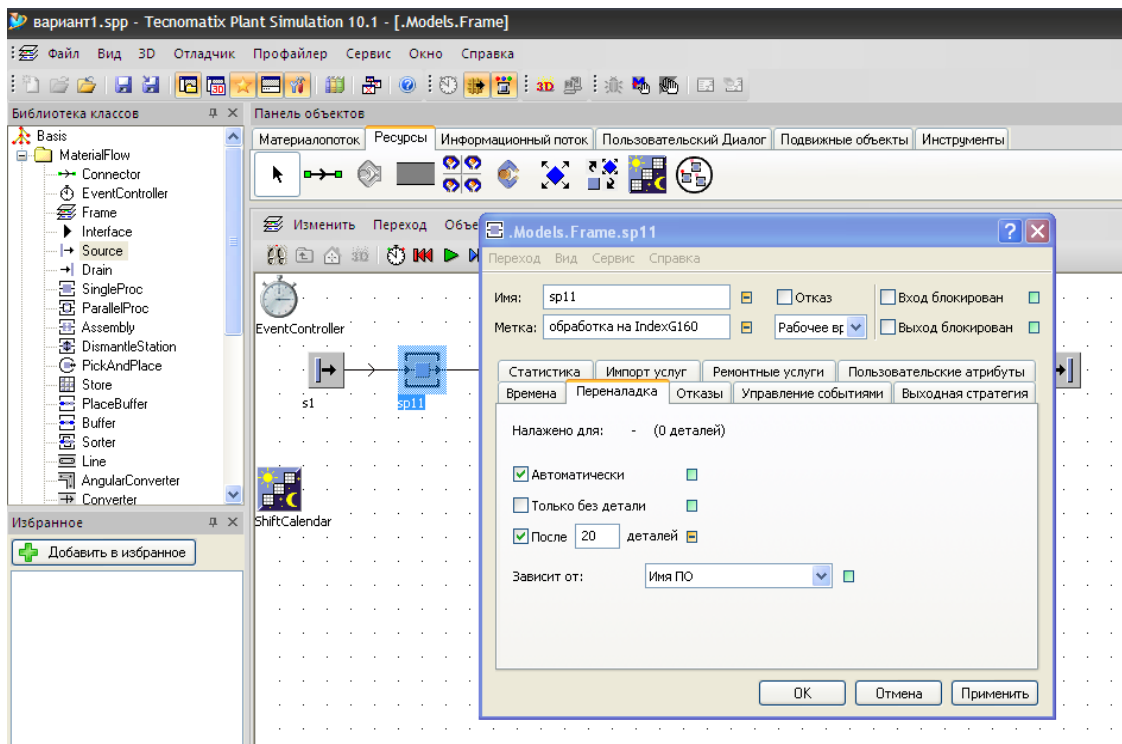


Рисунок 12 – Заполнение вкладки «Переналodka»

10. Каждый элемент *SingleProg* представляет собой технологическую операцию. В определенный момент времени станок должен выполнять одну операцию, поэтому в схему необходимо ввести блокировку, с помощью элементов *Broker* и *Exporter*, которые находятся на панели инструментов *Ресурсы*. Добавляем в схему по 5 элементов *Broker* и *Exporter*, т.к. мы используем 5 станков. Переименуем элементы *Broker* – br1..br8, и *Exporter* ex1..ex8, с помощью клавиши F2 (рисунок 13).

11. Необходимо связать между собой *Exporter* и *Broker*. Для Ex1 в диалоговом окне открываем вкладку *Атрибуты*, в строке *Broker* выбираем из списка - br1.

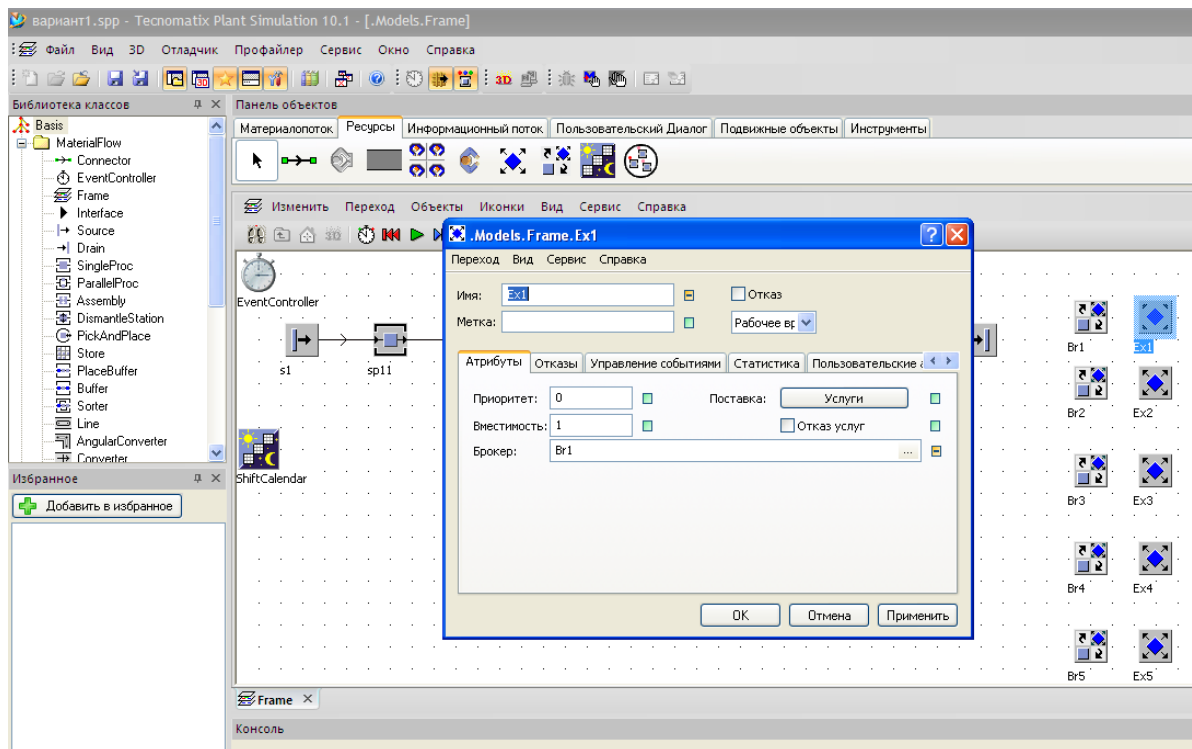


Рисунок 13 - Диалоговое окно Ex1

12. Свяжем *ProgSingle* с *Broker*. Для этого во вкладке диалогового окна *ProgSingle* во вкладке *Импорт услуг* указываем *Услуги для наладки работы* и в строке *Broker* выбираем необходимый элемент, для черновой обработки корпуса - *br1*.

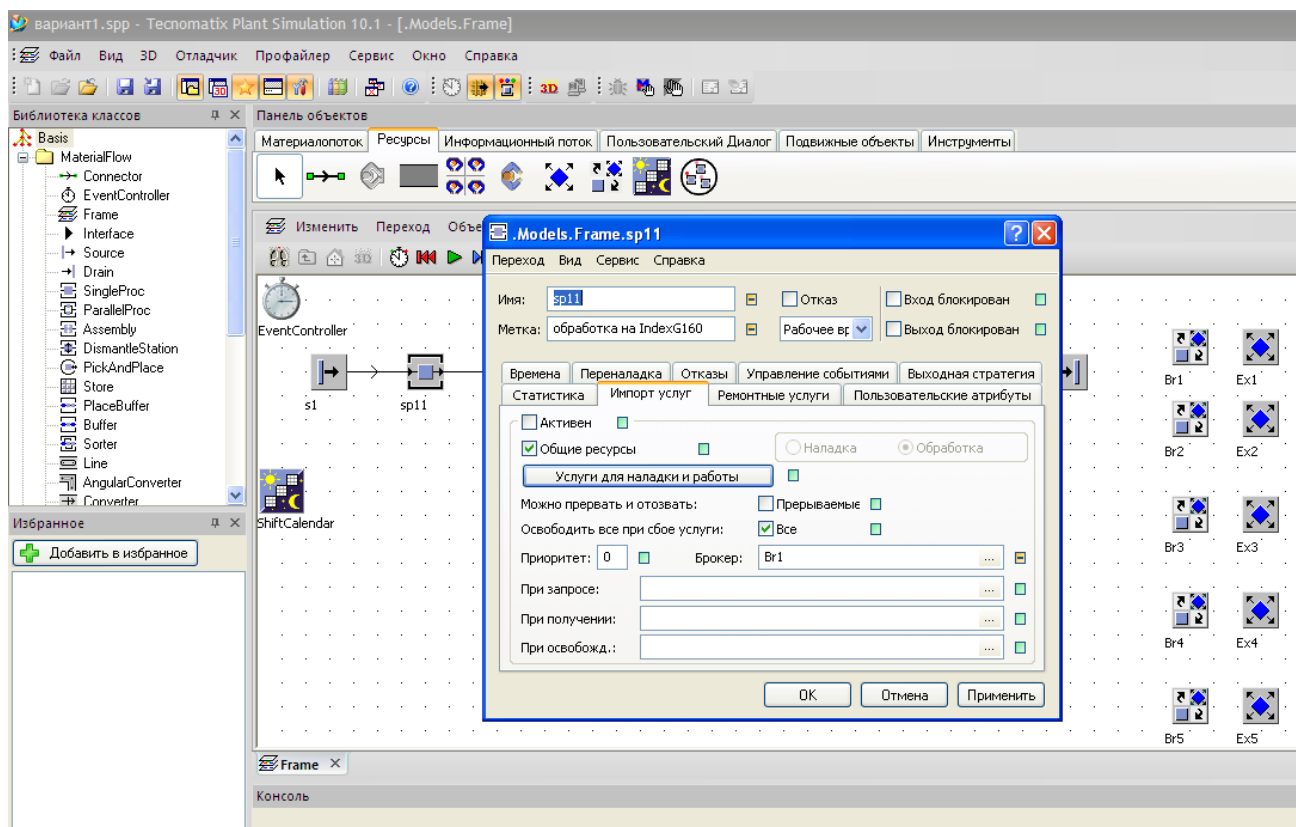



Рисунок 14 - Диалоговое окно параметров объекта, вкладка Импорт услуг

Аналогично производим связь других элементов *Exporter* и *Broker* между собой, а так же с операциями технологического процесса *ProgSingle*.

13. Для начала симуляции необходимо в *Event Controller* нажать *Старт* или кнопку .

При симуляции объекты материального потока имеют определенный статус, который отображается над элементами точками: *Красная точка* – объект сломан; *Синяя* – перерыв в работе; *Зеленая* – объект находится в работе; *Желтая* – объект заблокирован; *Серая* – производится настройка объекта

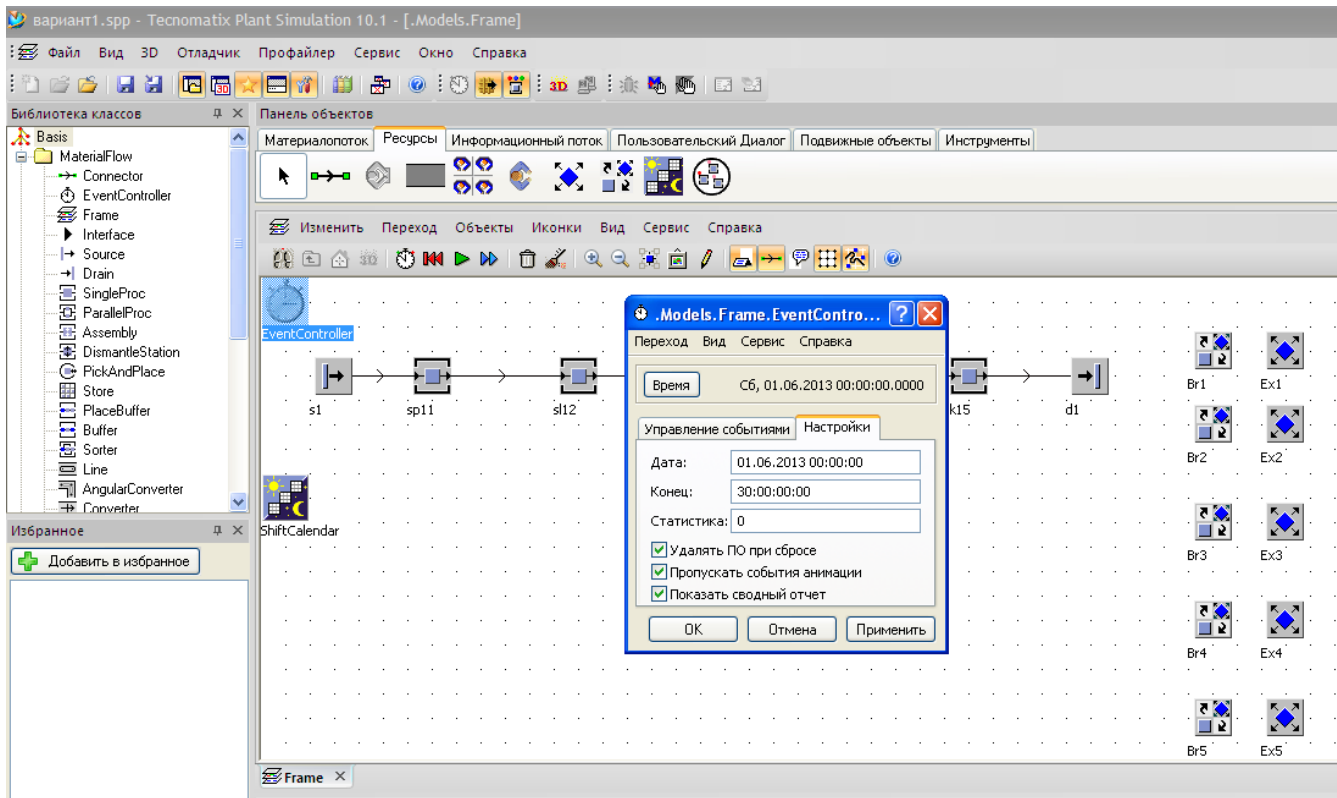


Рисунок 15 – Настройка *Event Controller* на месяц работы станка

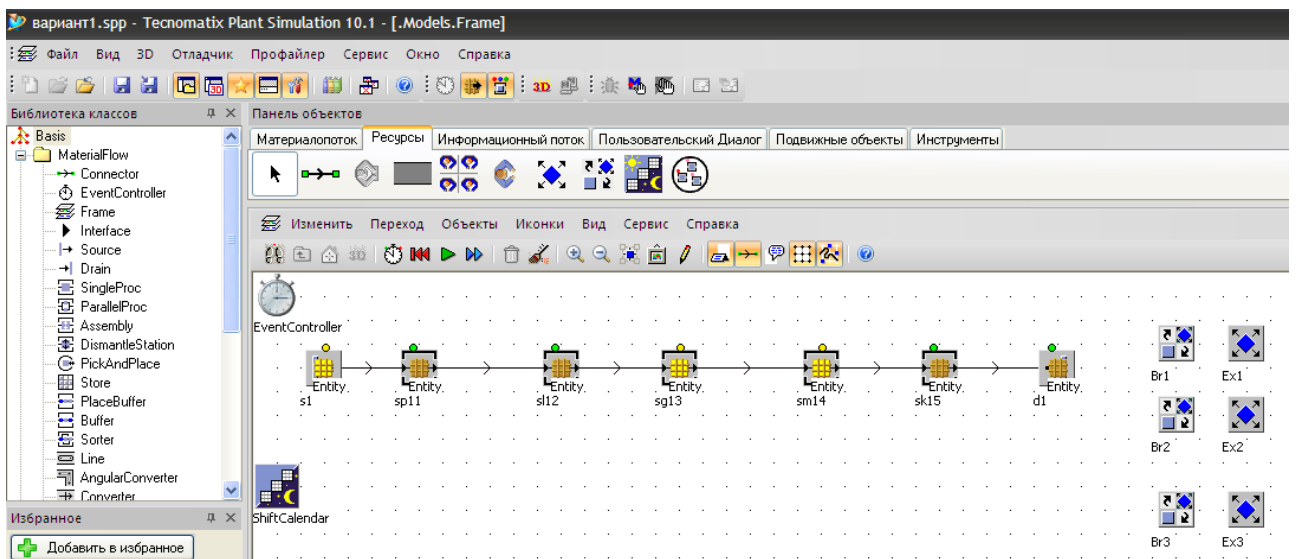


Рисунок 16 - Визуализация моделирования процесса изготовления детали «Корпус»

После завершения производственного цикла появляется возможность оценить эффективность использования оборудования.

14. Двойным щелчком по станку (*sp..*) открыть диалоговое окно и зайти на вкладку *Статистика* (рисунок 17-20).

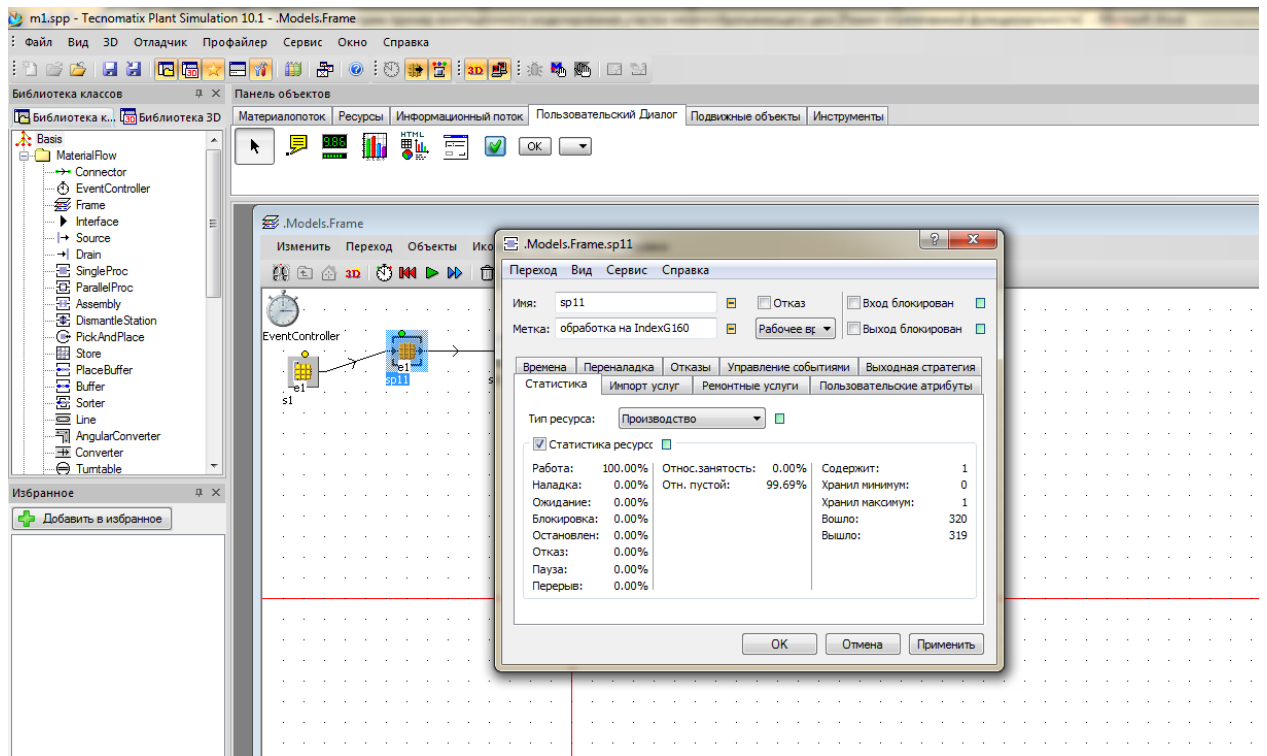


Рисунок 17 – Статистика моделирования работы станка Index G160

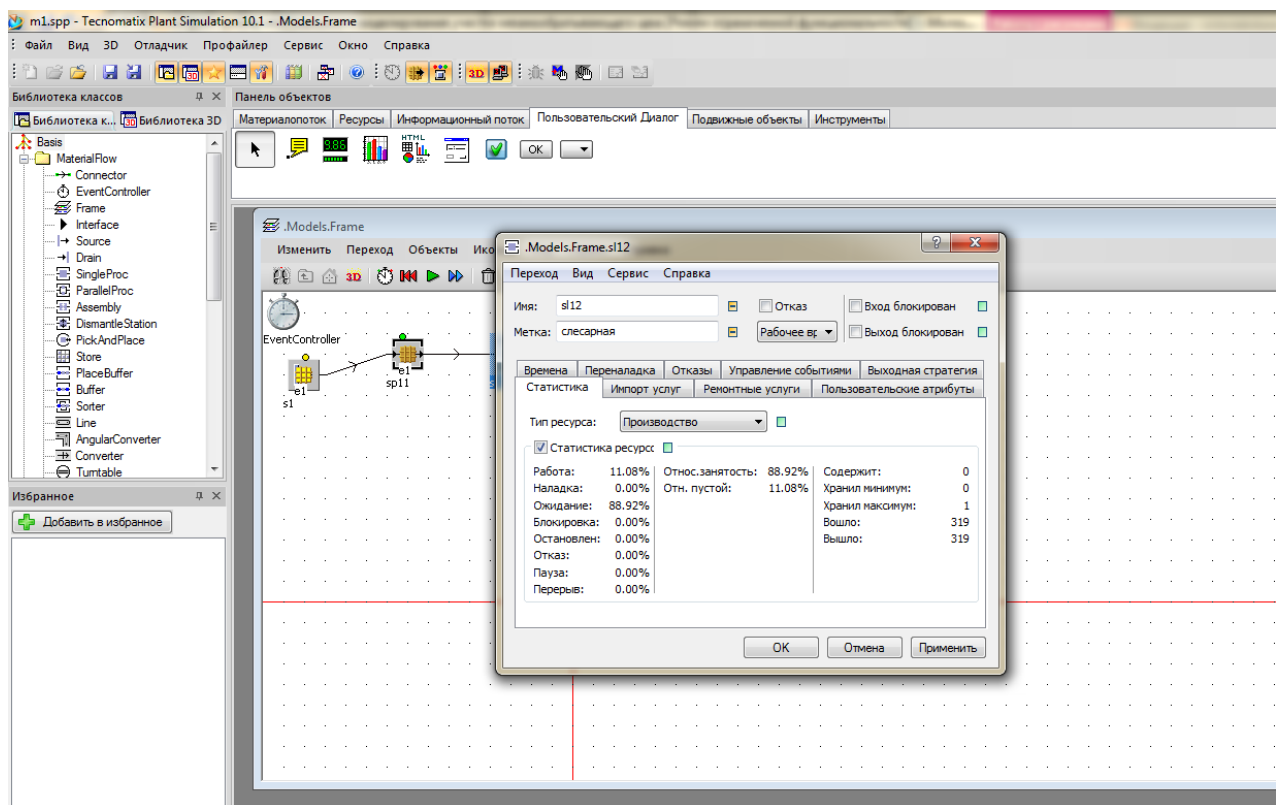


Рисунок 18 - Статистика моделирования работы верстака

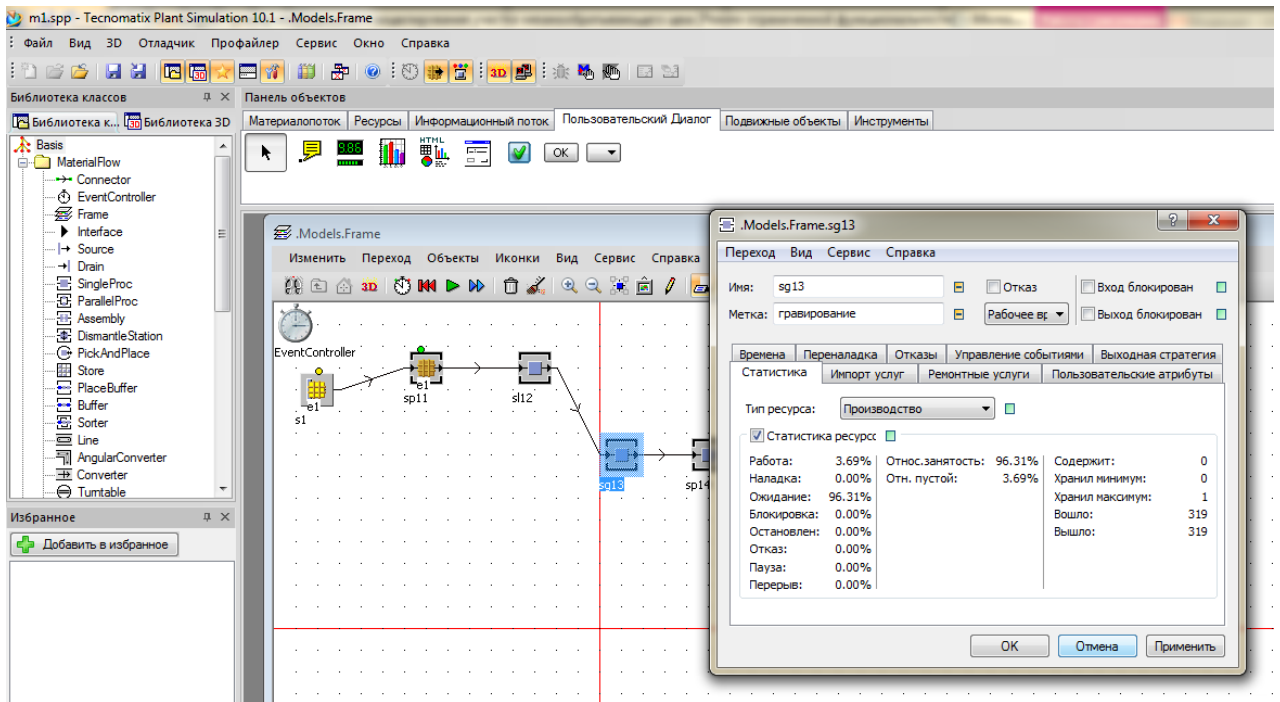


Рисунок 19 - Статистика моделирования работы копировально-фрезерного станка

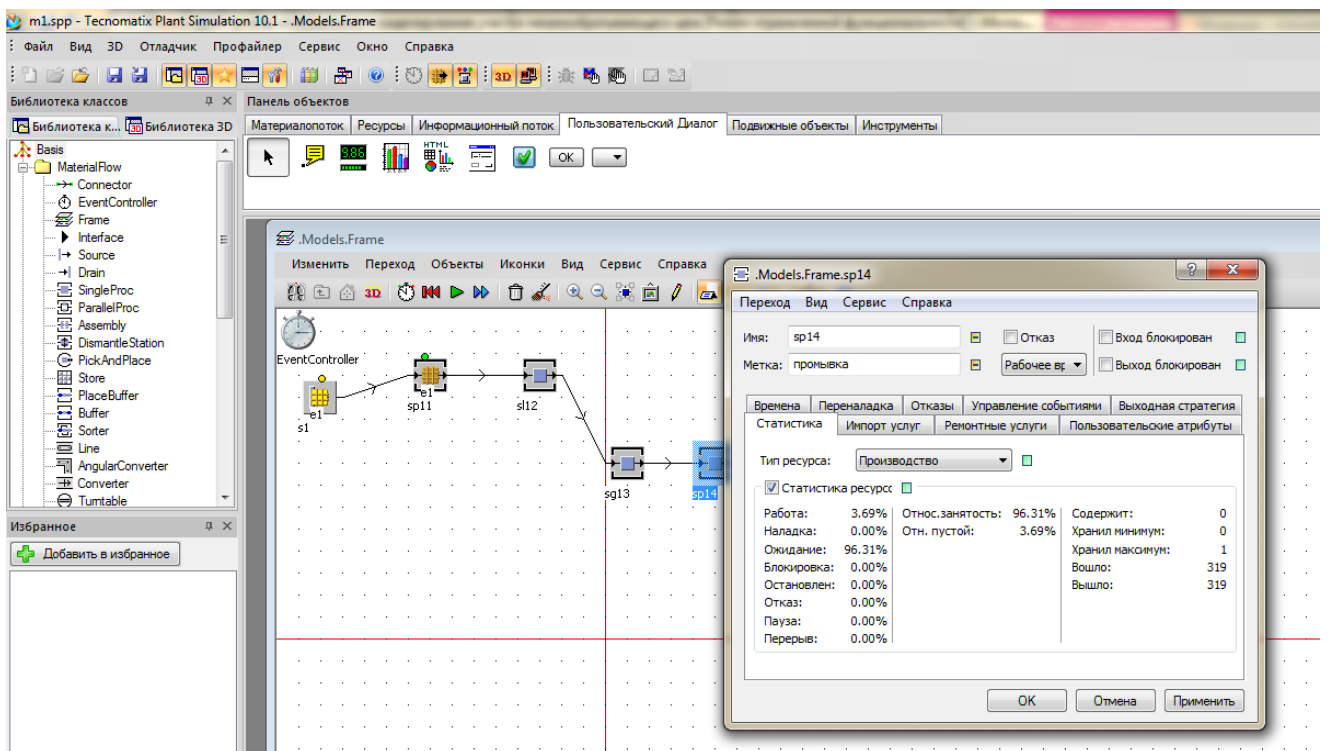


Рисунок 20- Статистика моделирования работы моечной машины

15. Далее следует открыть вкладку *Статистика* и *Статистика типа* каждого `sp` (рисунок 21-22).

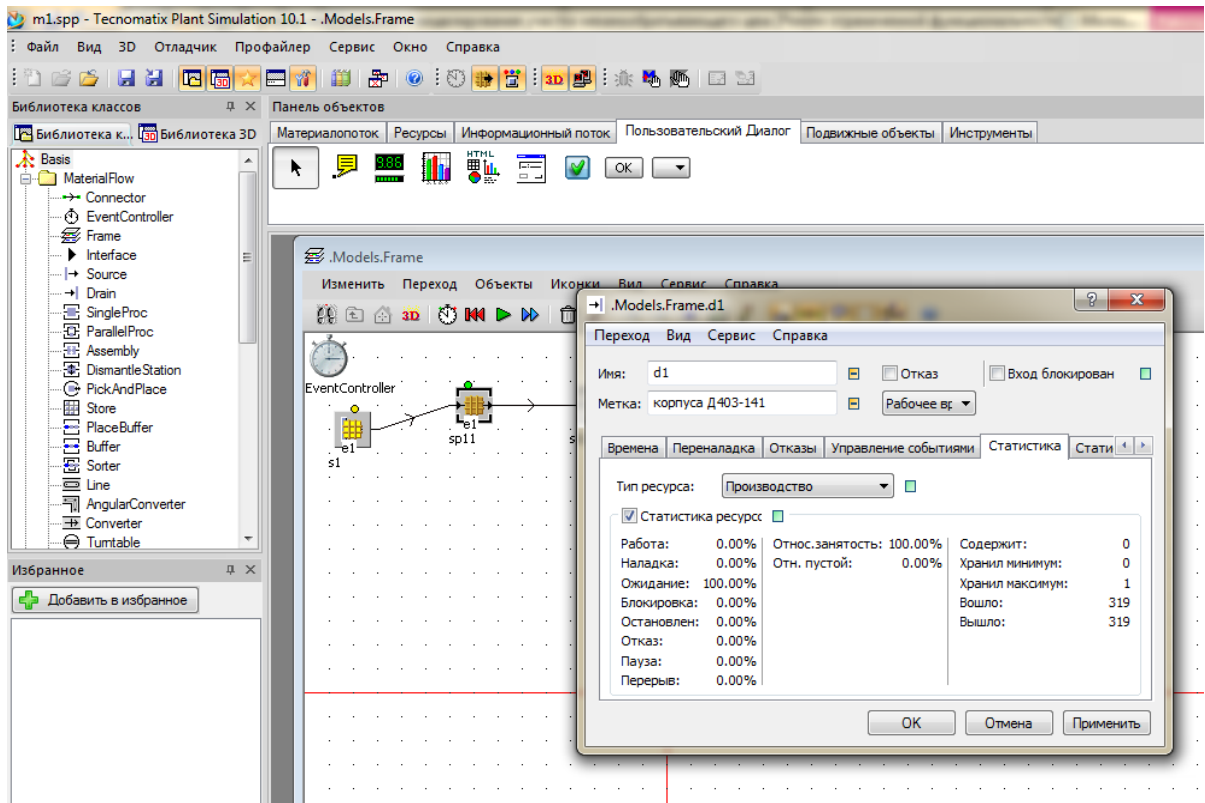


Рисунок 21 - Статистика моделирования (выходные параметры)

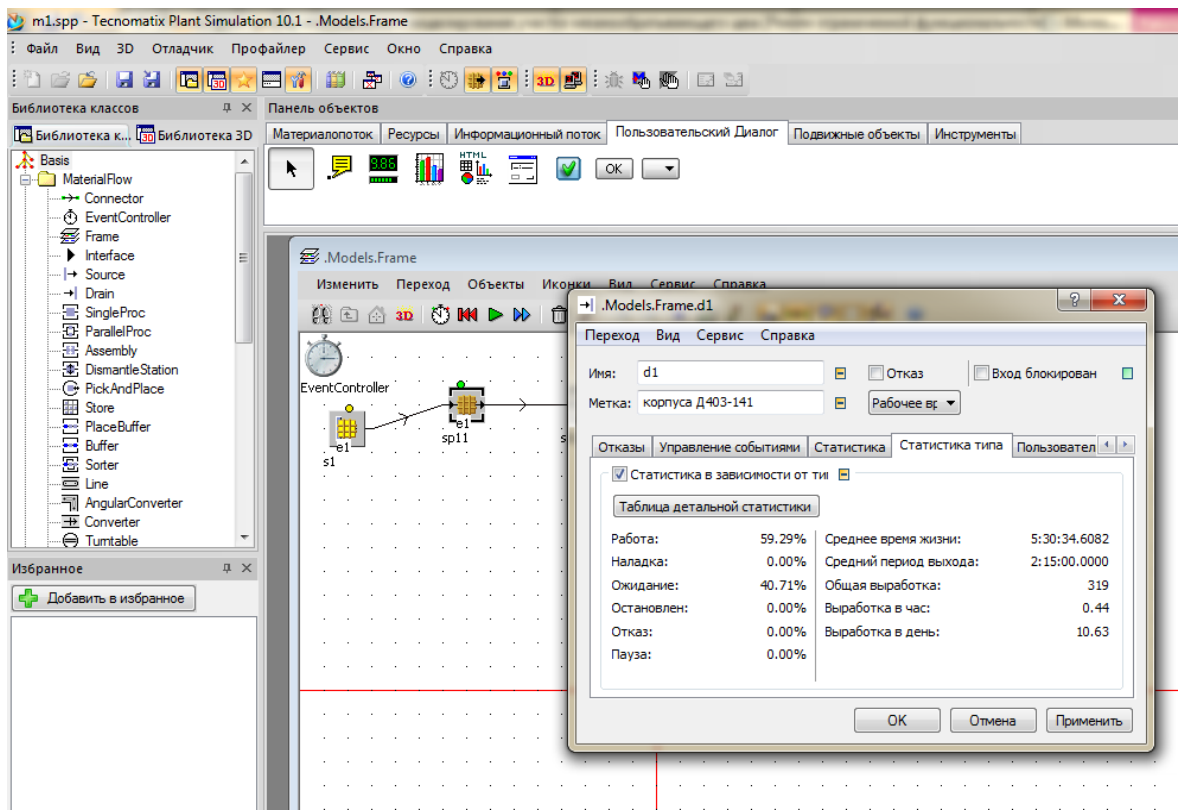


Рисунок 22 - Выходные параметры моделирования



Особое внимание нужно обратить на такую характеристику как Выработка (пропускная способность).

16. Для визуализации выходных параметров следует добавить объект *Display* (вкладка *Пользовательский Диалог*). Перетащив мышкой объект *d1* на него, увидим количество выходящих деталей.

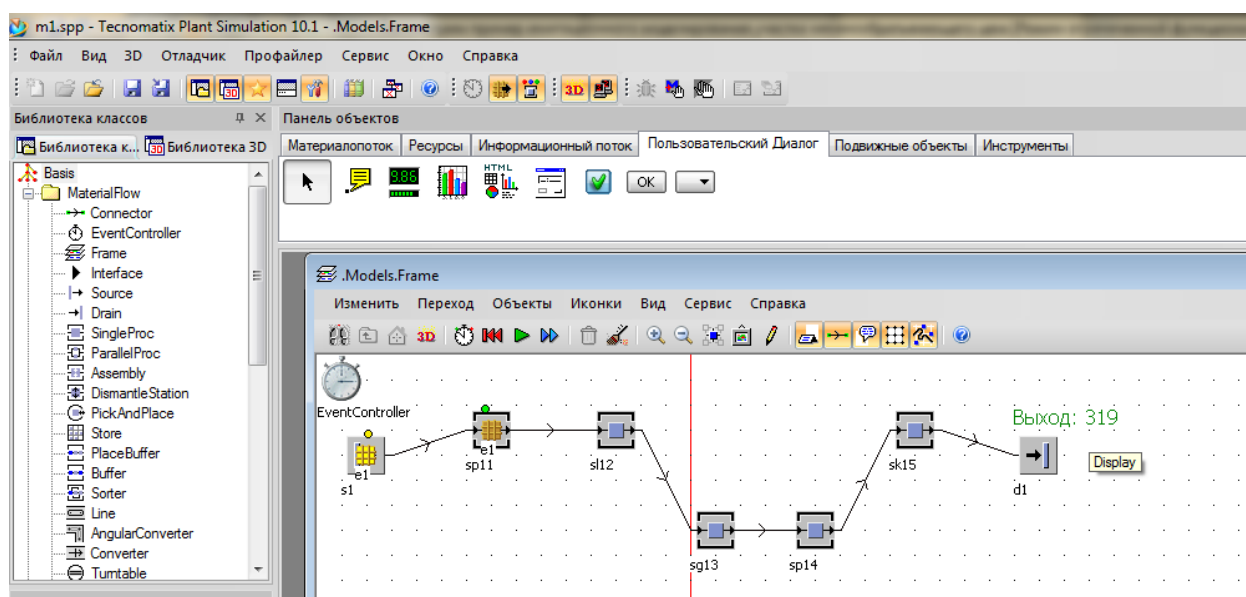
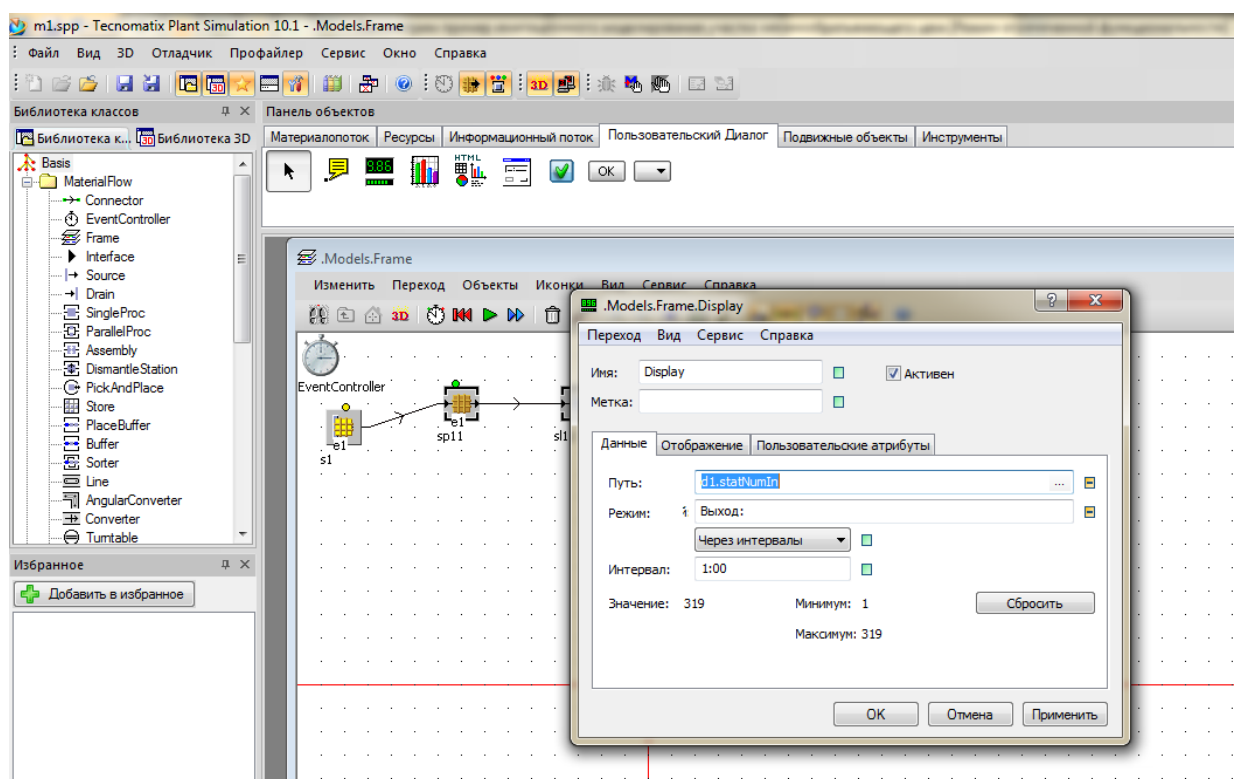


Рисунок 23 – Визуализация с помощью Display

В результате моделирования получили, что через месяц работы производственной линии изготовят 319 деталей. В принципе, это прогнозируемые результаты и такие данные мы могли получить с помощью Excel или ручного расчета.

Для более сложного и интересного моделирования введем параметры надежности системы:

17. На вкладке *Отказы* (по электрике, механике) диалогового окна каждого элемента sp11 создадим коэффициент надёжности оборудования - 0,9 и среднее время ремонта – 8 мин.

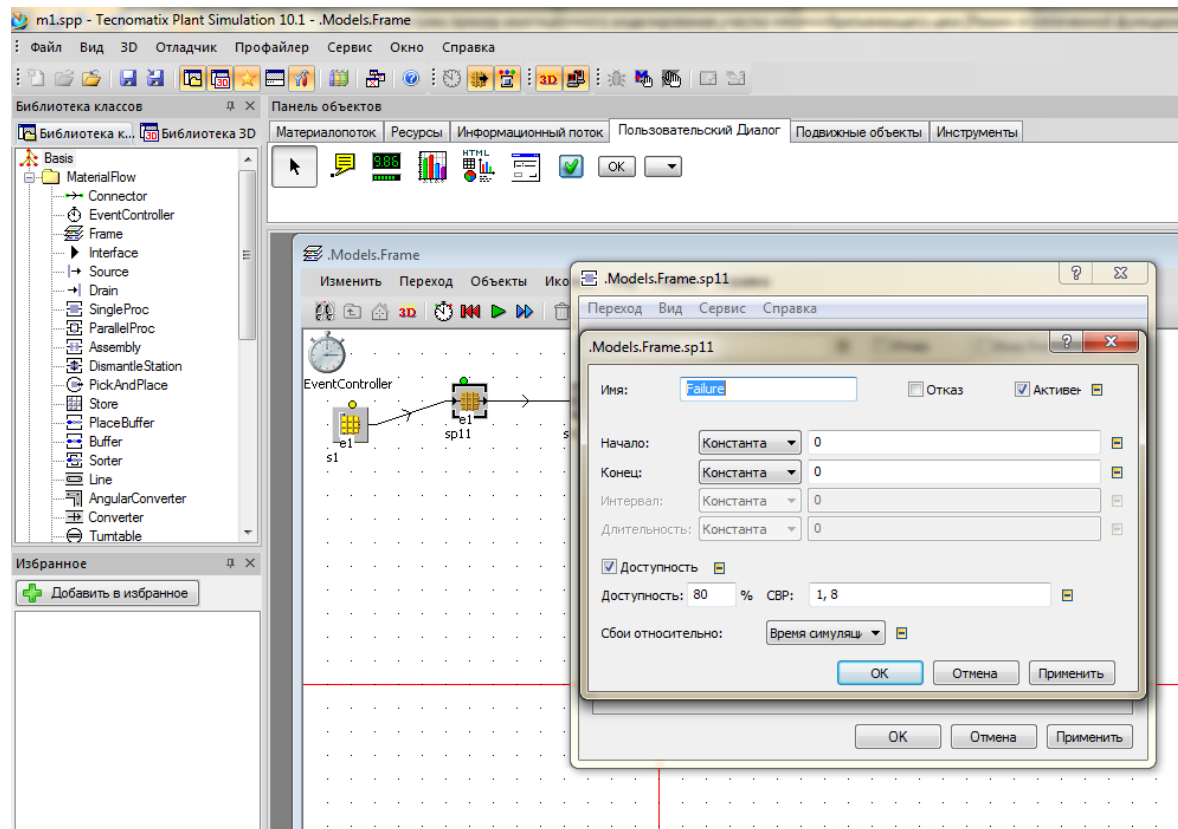


Рисунок 24 – Заполнение параметров надежности системы

18. Перезапустим симуляцию .

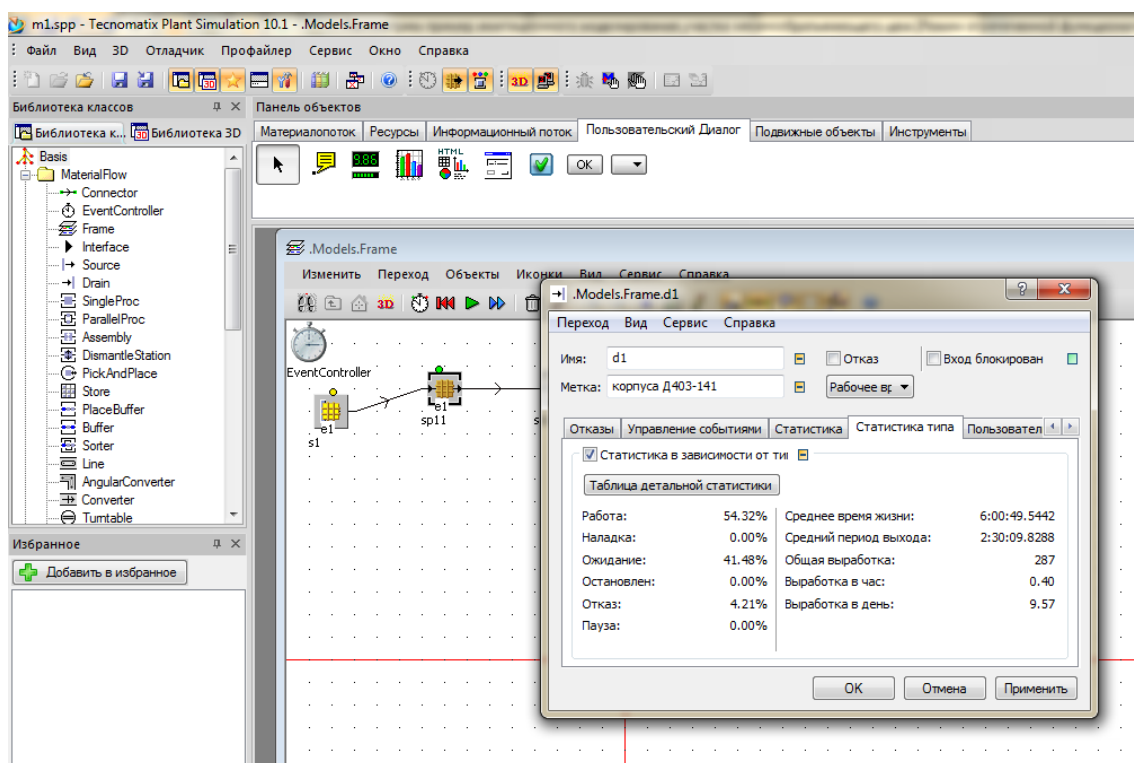
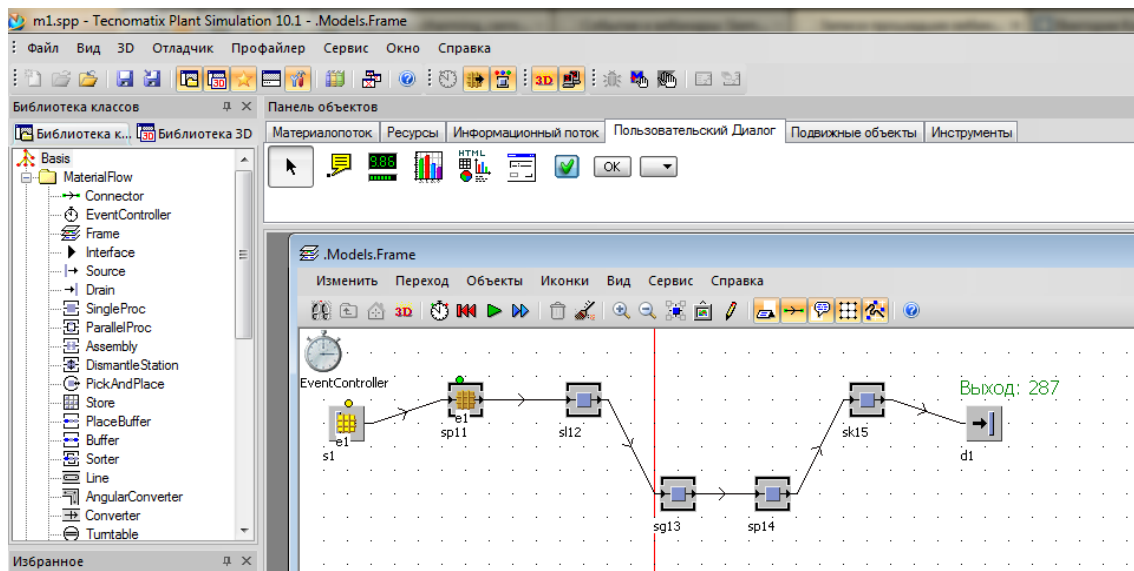


Рисунок 25 – Моделирование производственного процесса с элементом надёжности системы

Видно, что в результате получаем уже не 319 деталей, а 287 с учетом надёжности производственного оборудования 90%.

19. Введем в модель элемент *Chart*, который будет изображать общую картину загрузки и работы оборудования (вкладка *Инструменты*).

Для просмотра картины загрузки оборудования необходимо мышкой перетащить каждый *sp* на *Chart*.

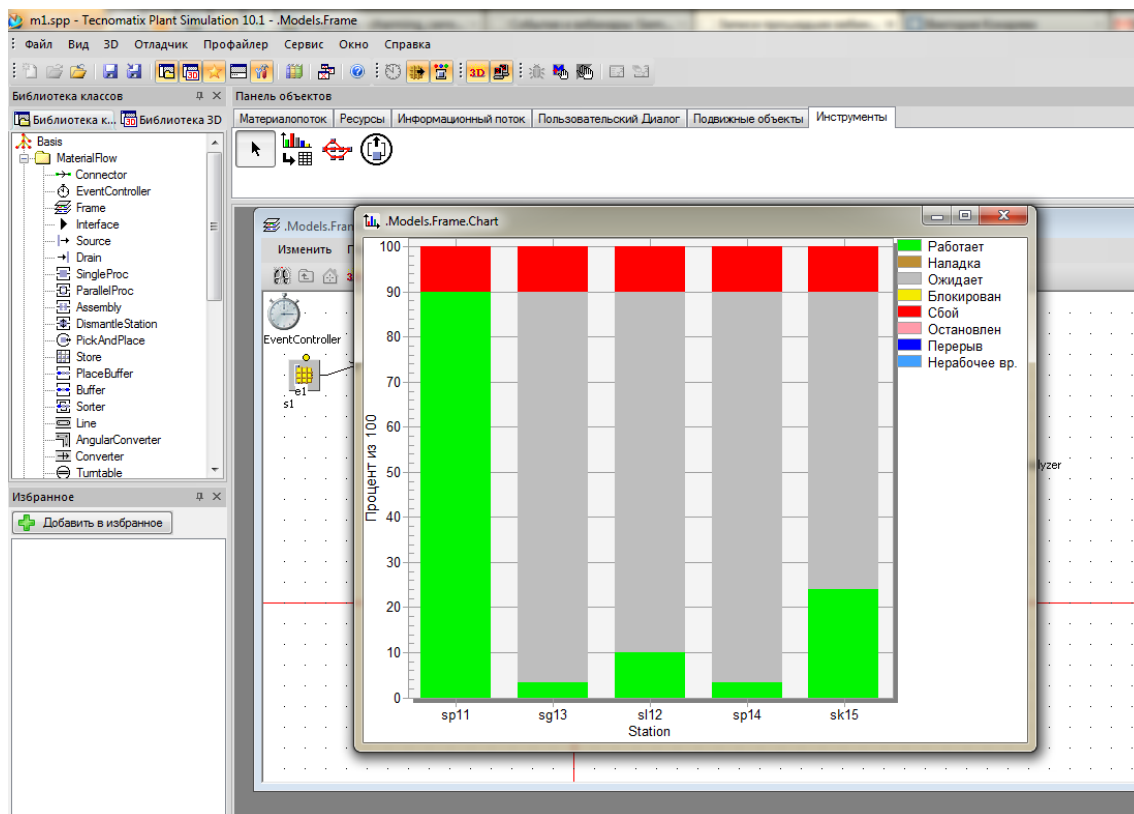


Рисунок 26 – Анализ работы оборудования

Видно, что наиболее нагружен станок Index G 160, а другое оборудование простаивает.

Далее рассмотрим принцип работы *Bottleneck Analyzer* (узкое место).

20. Добавьте в рабочую область модели элемент *Bottleneck Analyzer* (вкладка *Инструменты*). Также как и с работой *Chart*, для просмотра картины загрузки необходимо мышкой перетащить каждый *sp* на значок *Bottleneck Analyzer*. Щелчком правой кнопкой мыши по *Bottleneck Analyzer* выбираем функцию *Analyze*. После проведения симуляции над каждым *sp* появятся графики загрузки. На рисунке 27 представлен результат работы.

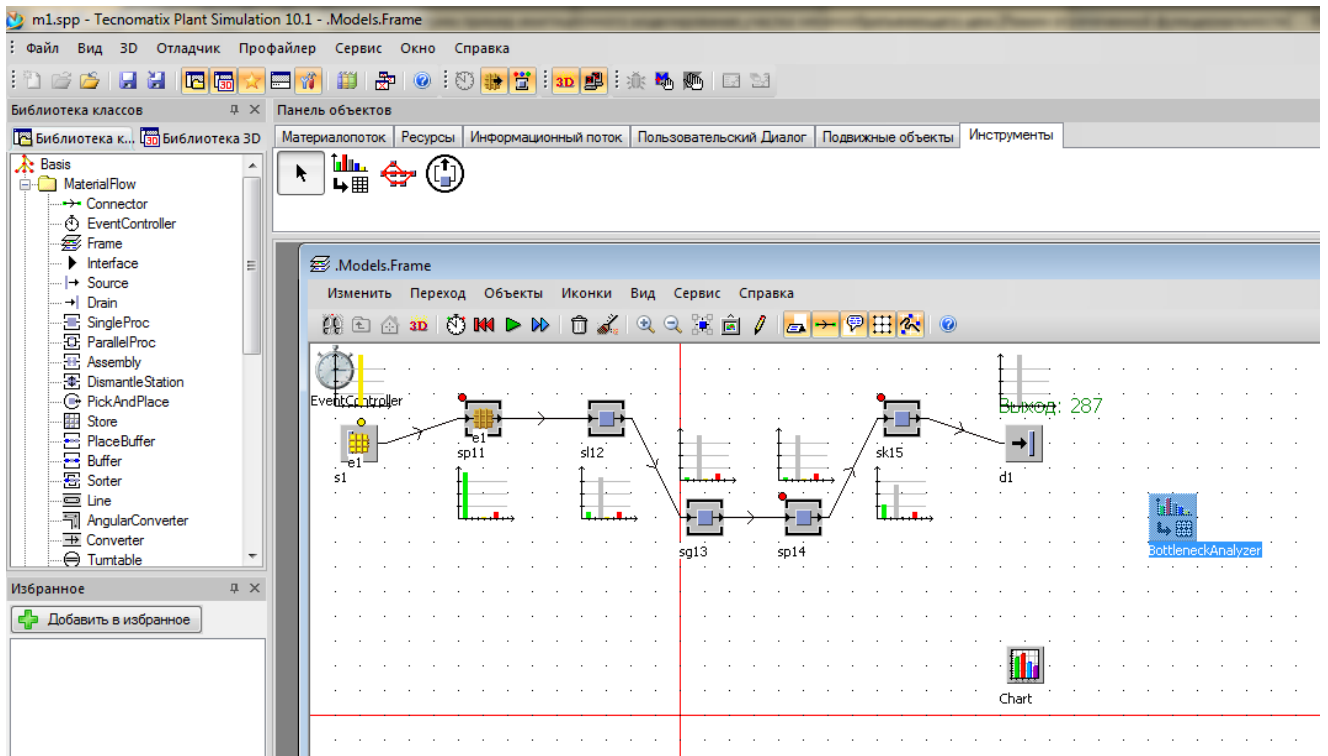


Рисунок 27 – Анализ узких мест

Далее в лабораторной работе предполагается разгрузить узкое место, добавив еще один станок. Процесс добавления станка аналогичен созданию уже имеющихся sp.

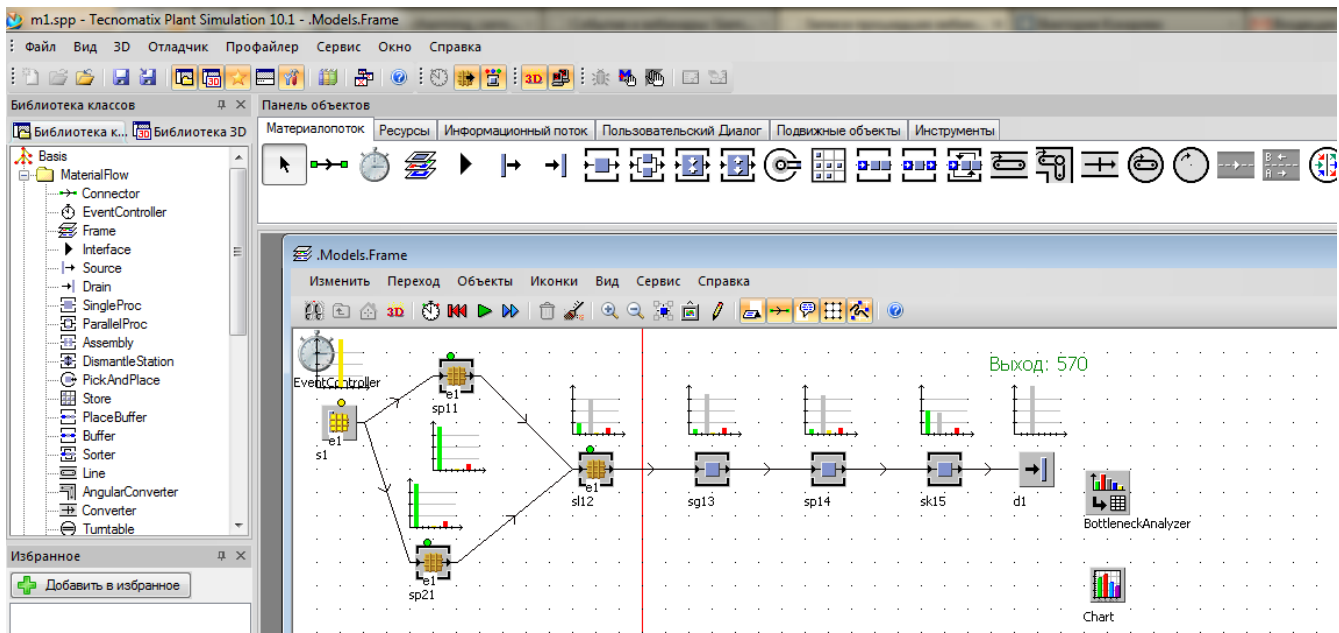


Рисунок 28 – Модель с добавленным станком sp21

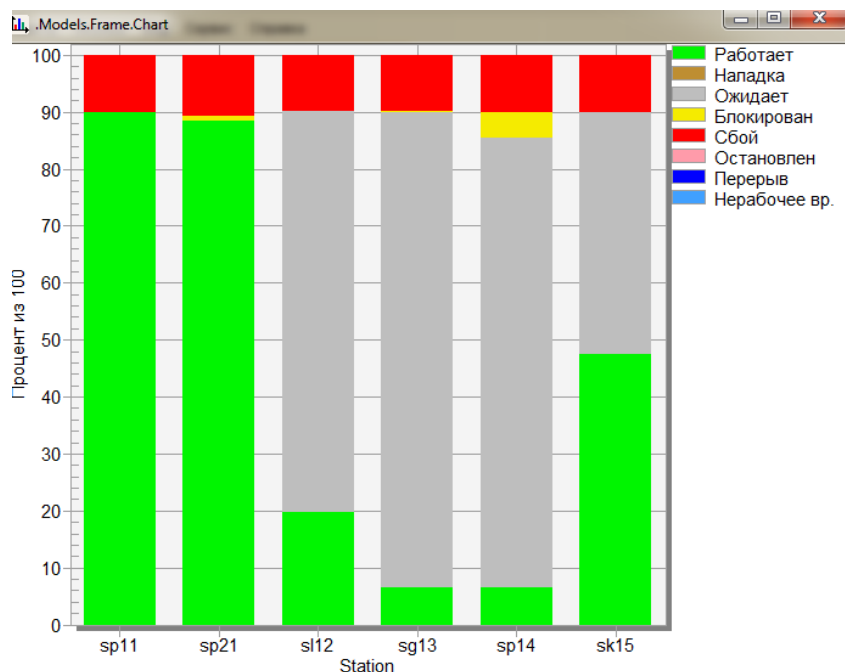


Рисунок 29 – Моделирование производственного процесса №2

После проведения симуляции картина загрузки оборудования изменилась.

Итак, зеленым цветом отмечено время работы, серым – простоя, желтым – блокировки (когда операция завершена, но передать на следующее оборудование не представляется возможным, так как оно занято), красным – время поломки.

Как и полагается, производительность второго производственного процесса (когда участвует 2 обрабатывающих центра Index G160) возросла почти в 2 раза, пропускная способность составляет 570 детали.

Так как в системе имеются поломки блокировка оборудования, а поломка одного станка ведет к простоям другого станка. Вставим в модель такие элементы, как *Buffer* (накопитель).

21. Добавьте в модель *Buffer* (вкладка *Материалопоток*). Соедините все элементы модели (*Connector*). Укажите емкость накопителя (вместимость) 100 деталей. Проведите симуляцию. Пример моделирования приведен на рисунке 30.

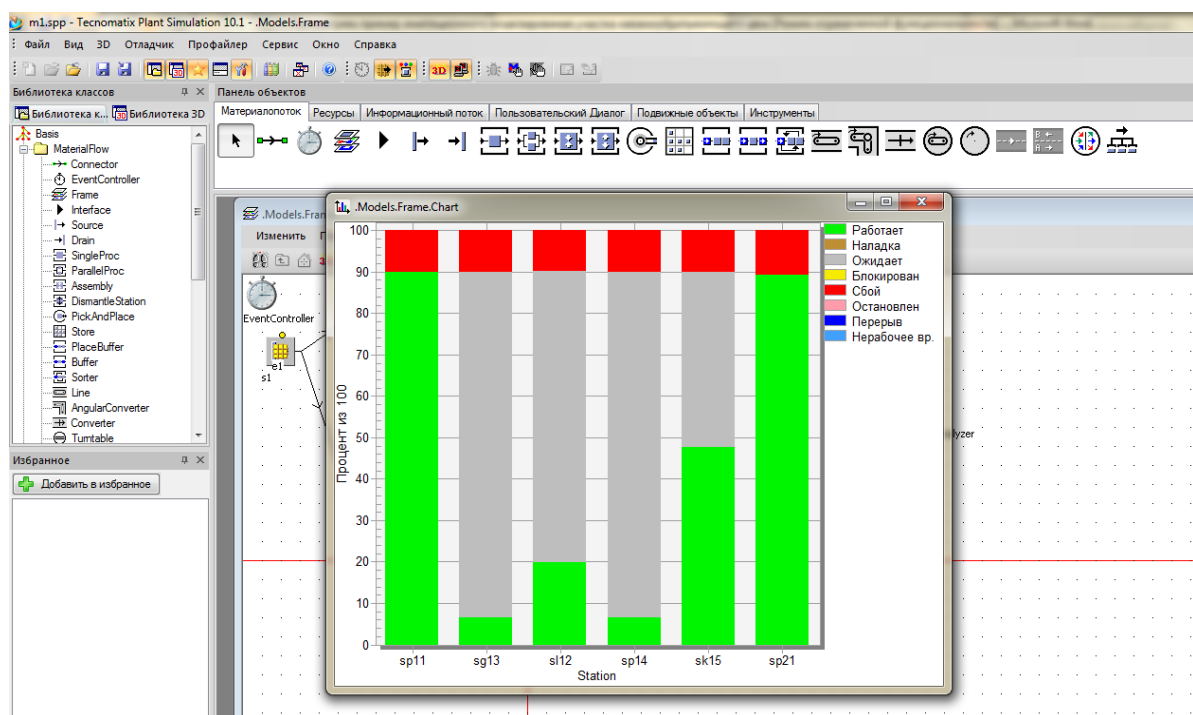
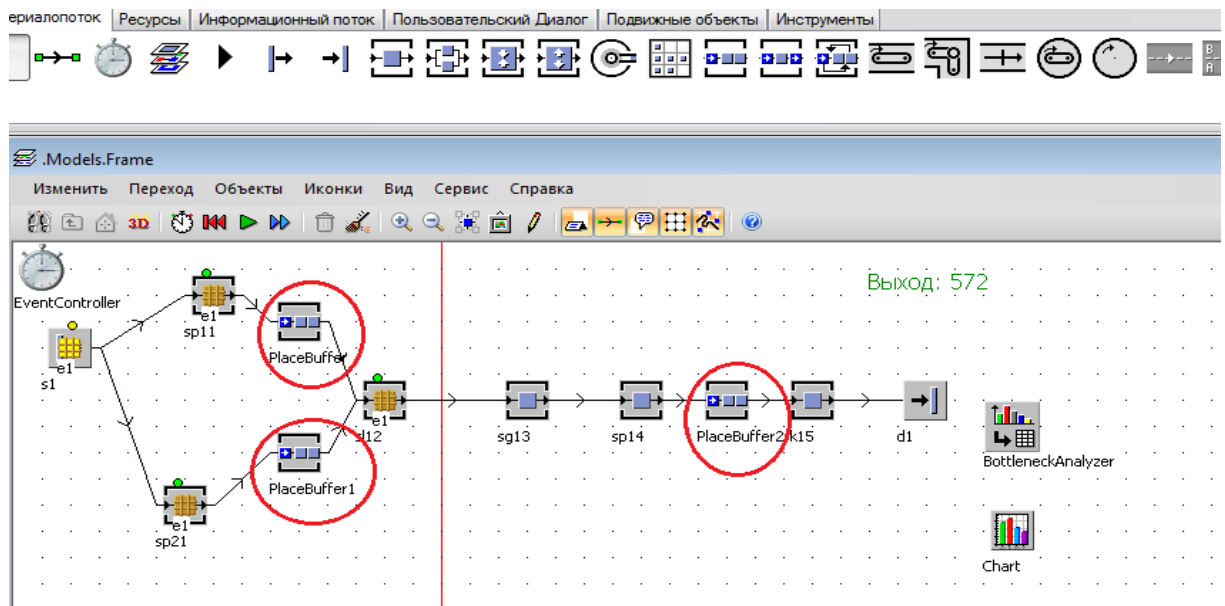
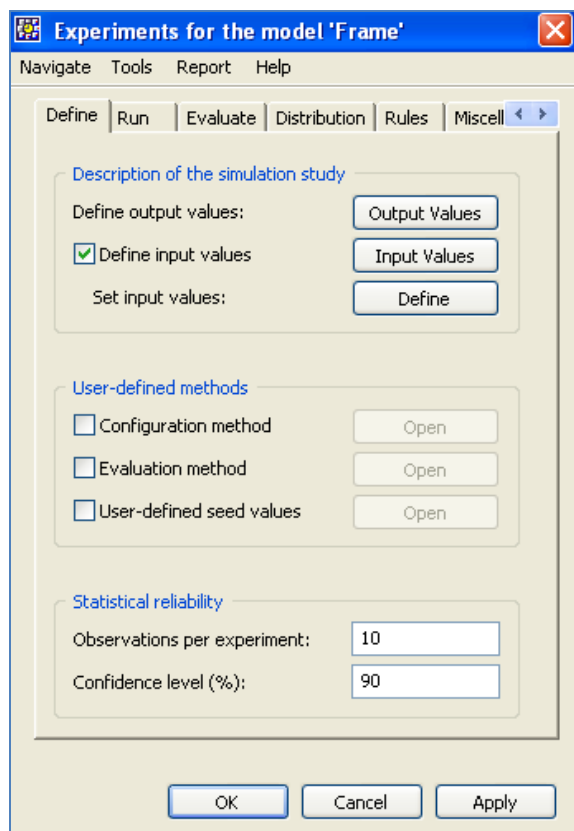


Рисунок 30 – Моделирование с элементами Buffer

Как видно, мы избавились от блокировки оборудования и увеличили число выпускаемых деталей на 2 шт.

Для оптимизации емкости накопителей без потери производительности производственной системы воспользуемся *Experiment Manager*.

22. Двойным щелчком по *Experiment manager* открываем характеристики:



23. Открываем вкладку *Output values* (выходные значения) и перетаскиваем мышкой *Drain- d1* в пустую строчку. В строке *Observations per experiment* (наблюдение за экспериментом) введем любое значение, например 3, а в строке *Confidence level* (уровень безотказности) -90%. Откроем вкладку *Tools - Multi-level experimental*. Зададим следующие параметры для каждого из буферов: *Lower level* (низший предел) -5, *Upper level* (высший предел) -50 *Increment* (приращение) -5 подтвердим нажатием *Apply* и *Ok*. Открываем вкладку *Input values* (входные значения) и перетаскиваем мышкой *Buffer1* и *Buffer2* в пустые строчки. Щелчком правой кнопки мыши по *Experiment manager* выбираем *Start*.



В результате работы Experiment Manager было выявлено, что средняя пропускная способность достигается при емкости накопителей равной 1 детали.

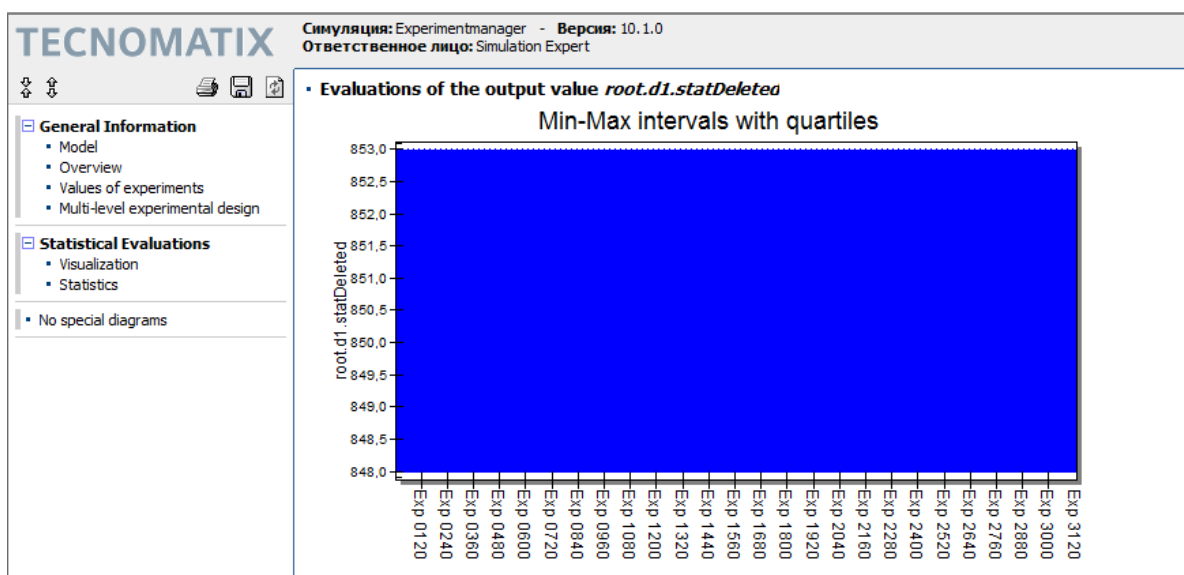
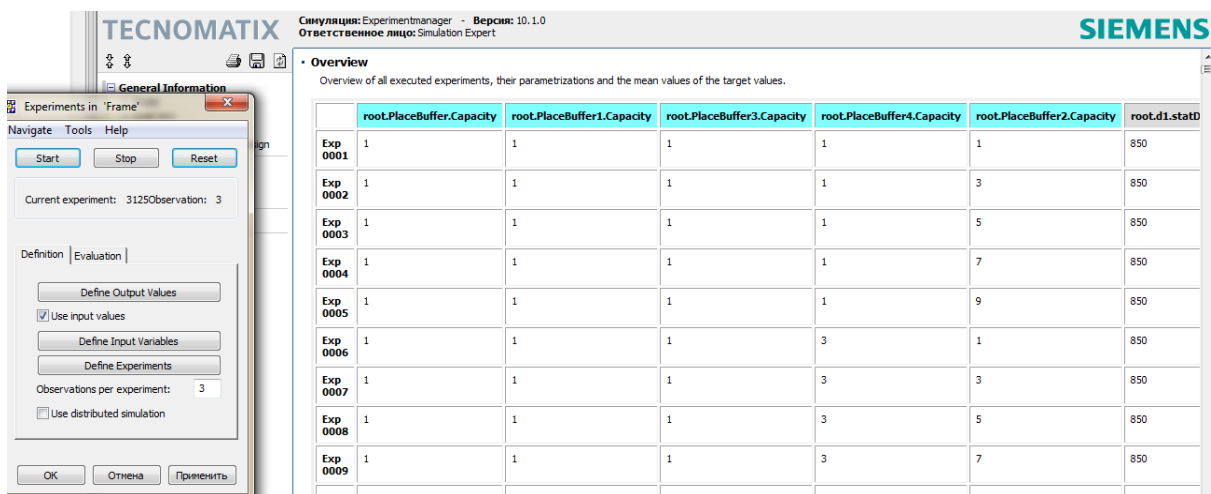


Рисунок 31 – Отчет Experiment Manager

Применим еще один инструмент для визуализации организации движения деталей в пространстве *Sankey Diagram*. Данный объект также находится на вкладке *Инструменты*.

24. Левой кнопкой мыши перетаскиваем любой из объектов на *Sankey Diagram* (например, взять объект s1). Двойным щелчком можно посмотреть основные параметры. В строке *Maximum width of the flows* (максимальная

ширина потока) можно изменить значение, например, возьмем 20. Чем больше ширина, тем больше пропускная способность. Т.е. иначе говоря, мы видим, как распределяется нагрузка между объектами.

25. Щелчок правой кнопкой по *Sankey Diagram* - *Display Sankey Diagram* – кнопка *Start/Stop*.

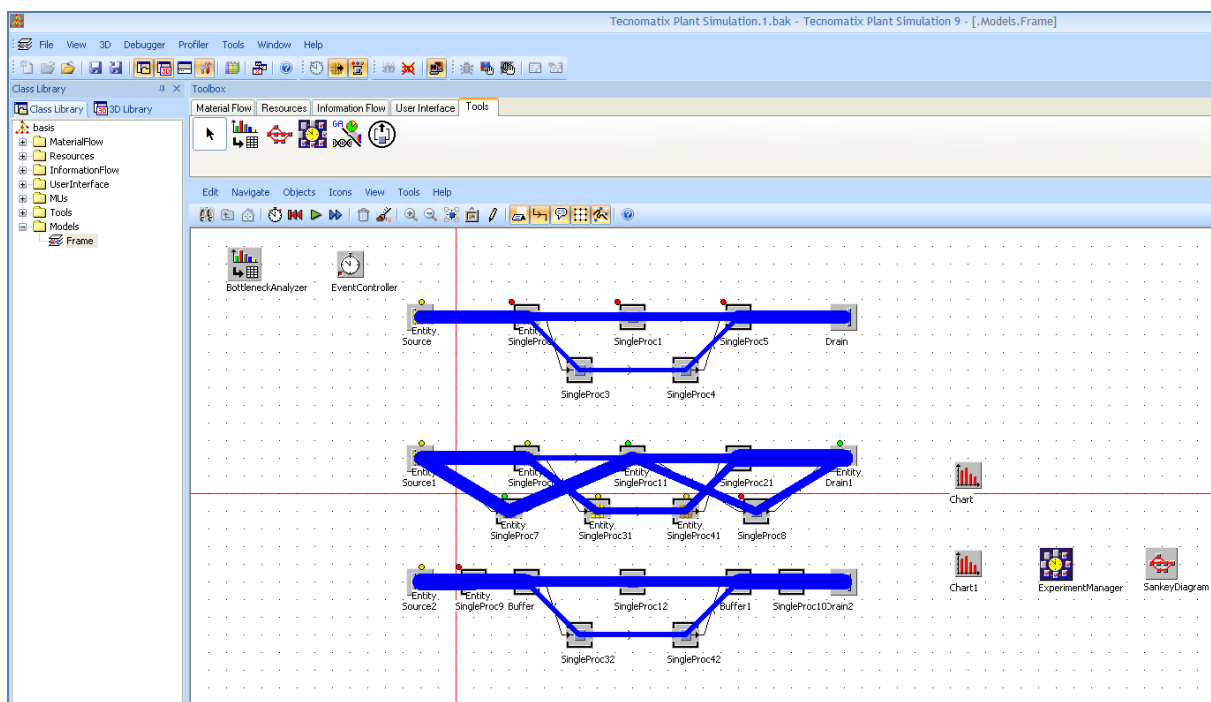


Рисунок 32 - Визуализация процесса с помощью Sankey Diagram

26. Сохранить разработанную модель.

27. Сделать выводы по результатам моделирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Siemens. Обзор продукта. Plant Simulation

[http://www.plm.automation.siemens.com/ru\\_ru/products/tecnomatix/plant\\_design/plant\\_simulation.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml)

2. Tadviser. Tecnomatix Plant Simulation. Основные возможности.

<http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Tecnomatix>

3. Дмитриевский, Б.С., Автоматизированные информационные системы управления инновационным наукоемким предприятием [Текст]/ Б.С. Дмитриевский. – М.: "Издательство Машиностроение-1", 2006. – 156 с.

4. Тычинский, А.В. Управление инновационной деятельностью компаний: современные подходы, алгоритмы, опыт [Текст]/ А.В. Тычинский. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 189 с.