

Концепция инструмента  
имитационного моделирования  
дискретных производств  
PlantTwin

# Содержание

<b>Содержание .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Введение .....</b>	<b>4</b>
1.1. Назначение документа .....	4
1.2. Цель создания инструмента .....	4
1.3. Границы моделируемого объекта .....	4
1.4. Предположения и допущения, принимаемые при моделировании .....	4
<b>2. Моделируемые объекты и сущности .....</b>	<b>6</b>
2.1. Общее описание моделируемой системы .....	6
2.1.1. Структура и состав моделируемой системы .....	6
2.1.2. Механика функционирования моделируемой системы .....	7
2.2. Материальный поток .....	8
2.2.1. Продукт .....	8
2.2.2. Изделие .....	8
2.2.3. Подборка .....	8
2.2.4. Комплектующее .....	8
2.2.5. Дерево изделий .....	8
2.2.6. Логистические категории .....	10
2.2.7. Типы вместимости .....	10
2.2.8. Коэффициенты использования вместимости .....	10
2.3. Производственные мощности .....	10
2.3.1. Производственные центры (ПЦ) .....	10
2.3.2. Типы производственных центров .....	11
2.3.3. Расписания работы ПЦ .....	11
2.3.4. Плановые периоды недоступности ПЦ .....	11
2.3.5. Ремонты по наработке .....	11
2.3.6. Поломки ПЦ .....	12
2.3.7. Накопители .....	12
2.3.8. Внешние подрядчики .....	12
2.4. Основные данные производства .....	12
2.4.1. Операции .....	12
2.4.2. Производительность ПЦ .....	13
2.4.3. Производительность внешних подрядчиков .....	13
2.4.4. Начальный запас .....	14
2.4.5. Покупной продукт .....	14
2.5. Структура производства .....	14
2.6. Ресурсы .....	14
2.7. Производственная программа .....	15
2.8. Транспортная сеть .....	15
2.8.1. Узлы транспортной сети .....	15

---

2.8.2.	Транспортные связи .....	15
<b>3.</b>	<b>Моделируемые процессы и алгоритмы .....</b>	<b>16</b>
3.1.	Алгоритм планирования .....	16
3.1.1.	Общая концепция алгоритма планирования .....	16
3.1.2.	Описание алгоритма планирования.....	18
3.1.3.	Критерии выбора альтернатив.....	19
3.1.4.	Планирование пополнения покупных продуктов.....	20
3.1.5.	Планирование транспортировки изделий .....	21
3.2.	Моделируемые процессы.....	22
3.2.1.	Производство изделий в соответствии с планом .....	22
3.2.2.	Работа производственных центров .....	23
3.2.3.	Работа внешних подрядчиков .....	24
3.2.4.	Хранение изделий в накопителях .....	24
3.2.5.	Поступление покупных продуктов на предприятие .....	25
3.2.6.	Транспортировка изделий внутри предприятия .....	25
3.3.	Моделирование с перепланированием .....	26
3.4.	Моделирование из внешнего плана .....	27
3.5.	Сценарный анализ.....	27
3.6.	Эксперимент Монте-Карло.....	27
<b>4.</b>	<b>Выходные данные.....</b>	<b>28</b>
4.1.	Данные визуализации планировщика и имитационной модели .....	28
4.2.	Отчеты и логи .....	28
4.2.1.	Результирующий отчет .....	28
4.2.2.	Файлы логов.....	28

# 1. Введение

## 1.1. Назначение документа

Настоящий документ – концепция инструмента имитационного моделирования дискретных производств PlantTwin. В концепции описаны:

- особенности моделируемой предметной области;
- основная функциональность PlantTwin;
- ограничения и допущения, принимаемые при работе с PlantTwin.

## 1.2. Цель создания инструмента

Инструмент PlantTwin создан для поддержки принятия решений при стратегическом и среднесрочном планировании работы цехов, предприятий и групп предприятий. PlantTwin может применяться для решения следующих задач:

- оценки достаточности производственных мощностей цеха, предприятия или группы предприятий для выполнения производственной программы
- обоснования инвестиций в модернизацию существующих и создание новых производственных мощностей
- валидации производственных планов и расписаний с помощью имитационного моделирования
- формирования обоснованного плана выполнения производственной программы
- сценарного анализа вариантов производственной кооперации между предприятиями холдинга или отрасли.

## 1.3. Границы моделируемого объекта

В PlantTwin планируются и моделируются процессы, происходящие внутри цехов производственного предприятия. Рассматриваются производственные активы предприятия (производственные центры, накопители) и материальный поток, состоящий из изделий, которые хранятся в накопителях, обрабатываются и собираются на производственных центрах и перемещаются по транспортной сети предприятия. Более подробно структура моделируемой системы описана в п.2.1.

## 1.4. Предположения и допущения, принимаемые при моделировании

№	Предположение или допущение
---	-----------------------------

№	Предположение или допущение
1	Не учитываются альтернативные производственные маршруты: для каждого изделия однозначно определяется последовательность операций, которые необходимо выполнить для его производства
2	Не моделируются транспортные ограничения (крановые операции, доступность передаточных тележек). Предполагается, что транспортных средств всегда достаточно для выполнения всех необходимых операций
3	В PlantTwin не учитывается расписание работы складов и прочих мест хранения изделий. Предполагается, что изделия, имеющиеся на складе, доступны для использования в любое время

## 2. Моделируемые объекты и сущности

### 2.1. Общее описание моделируемой системы

#### 2.1.1. Структура и состав моделируемой системы

Моделируемая система – предприятие, на котором выполняется дискретное производство изделий в соответствии с заданной технологией согласно производственной программе.

Схематично структура моделируемой системы показана на Рис. 1.

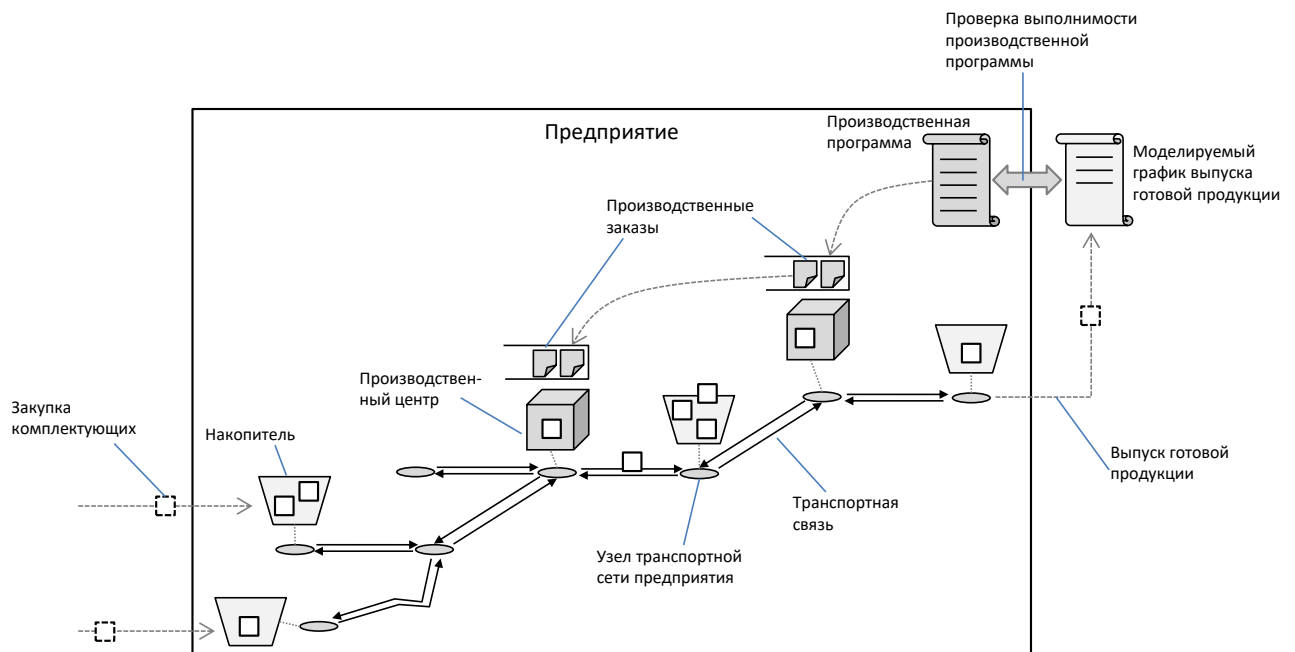


Рис. 1. Схематическое изображение структуры моделируемой системы

В моделируемую предметную область входят следующие основные объекты и сущности:

- Материальный поток - множество всех единиц продукции, производимых на предприятии и используемых при производстве в качестве комплектующих
- Производственные мощности:
  - Производственные центры (ПЦ)
  - Типы производственных центров
  - Применение графиков работы ПЦ (учет сменности и нерабочих дней)
  - Плановые периоды недоступности ПЦ
  - Ремонты по наработке
  - Поломки ПЦ
  - Накопители
  - Внешние подрядчики

- Основные данные производства:
  - Операции
  - Производительности ПЦ
  - Производительности внешних подрядчиков
  - Записи о начальном запасе изделий
  - Записи о параметрах пополнения покупных комплектующих
- Организационная структура – структурные подразделения, к которым относятся производственные центры и ресурсы
- Ресурсы:
  - Типы ресурсов
  - Наборы ресурсов
  - Ресурсы
  - Применение наборов ресурсов при выполнении операций
  - Плановые периоды недоступности ресурсов
- Производственная программа, которая задает целевой график производства готовых изделий
- Транспортная сеть предприятия:
  - Узлы транспортной сети
  - Транспортные связи.

### **2.1.2. Механика функционирования моделируемой системы**

Логика PlantTwin разделена на два блока – планировщик и модуль имитации. Работа PlantTwin состоит из двух последовательных этапов:

1. Планирование работы производственных центров, выполняется планировщиком
2. Имитация работы производственных центров, выполняется модулем имитации на основании плана, составленного планировщиком

Планировщик предназначен для составления расписаний работы ПЦ, выполняющих операции над изделиями, для выполнения производственной программы. Планировщик учитывает:

- Максимальную длительность операций,
- Графики работы ПЦ,
- Плановые периоды недоступности ПЦ,

Имитационная модель детально воспроизводит работу производственных центров. На вход модулю имитации подается план, составленный планировщиком. На своевременность выполнения плана влияют следующие факторы, рассматриваемые в модуле имитации и не учитываемые планировщиком:

- Вероятностное распределение длительности операций (треугольное распределение),

- Задержки поставки покупных изделий,
- Ремонты по наработке ПЦ
- Внеплановые ремонты (поломки) ПЦ
- Переполнение накопителей, приводящее к невозможности своевременного перемещения деталей и комплектующих между ПЦ.

## 2.2. Материальный поток

Материальный поток – множество всех единиц продукции, производимых на предприятии и используемых при производстве в качестве комплектующих.

### 2.2.1. Продукт

Продукт – обобщающее название единицы материального потока, имеющей физическое воплощение, например, «Болт М6х14».

### 2.2.2. Изделие

Изделие – обобщающее название *производимой* единицы материального потока, содержащее информацию о ее физическом воплощении (продукте) и технологии изготовления. Например, продукт «Болт М6х14» может быть изготовлен с применением разного набора операций: фрезерованием на фрезерном станке или при помощи плашки на слесарном верстаке. В этом случае одному продукту будут соответствовать 2 изделия, для каждого из которых в PlantTwin будет задан уникальный идентификатор, например, А-1 и А-2.

### 2.2.3. Подборка

На любой стадии изготовления изделия, т.е. на этапе любой операции над изделием, частично готовое изделие может рассматриваться как подборка.

### 2.2.4. Комплектующее

Комплектующее – обобщающее название *покупной* единицы материального потока, содержащее информацию о ее физическом воплощении (продукте).

### 2.2.5. Дерево изделий

Для отражения взаимосвязей изделий при производстве конечного изделия используется понятие «дерево изделий».

Изделиям в дереве соответствуют производимые продукты, комплектующим – покупные продукты, подборкам – операции.



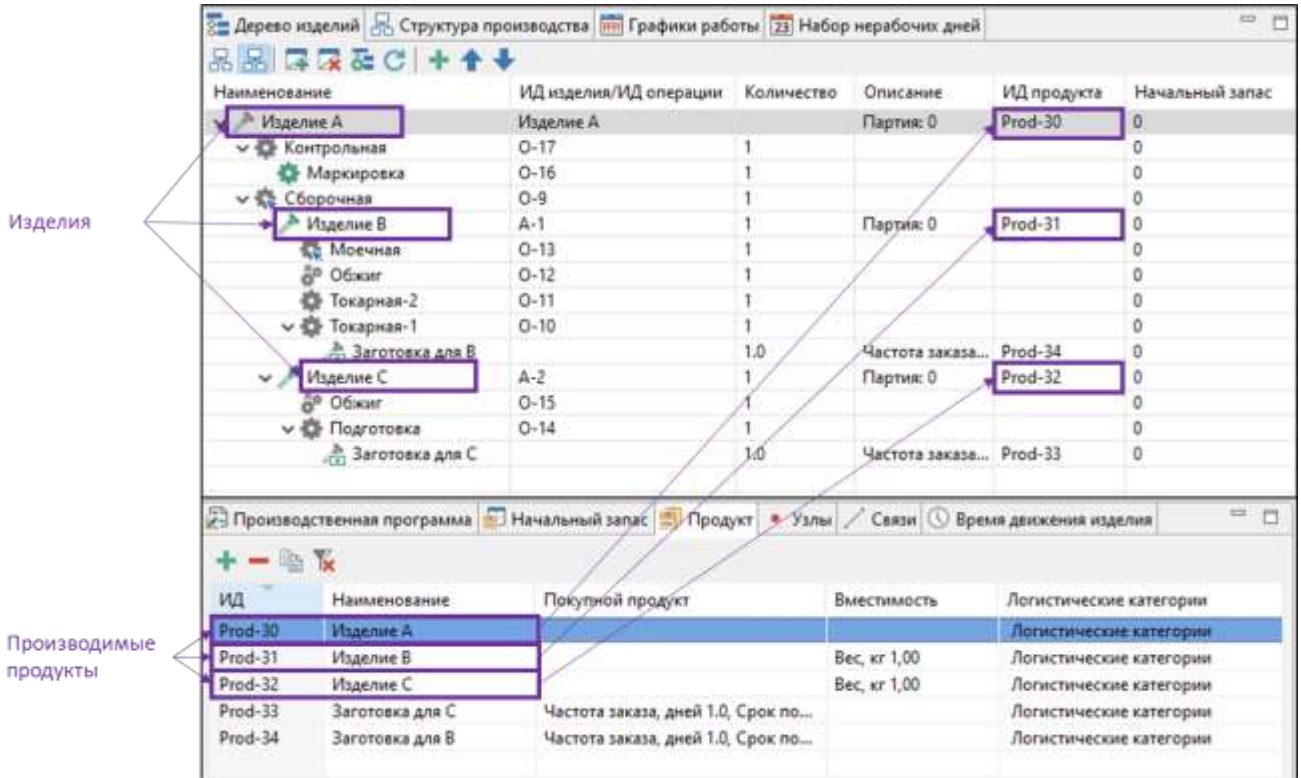


Рис. 2. Изделия в дереве изделий

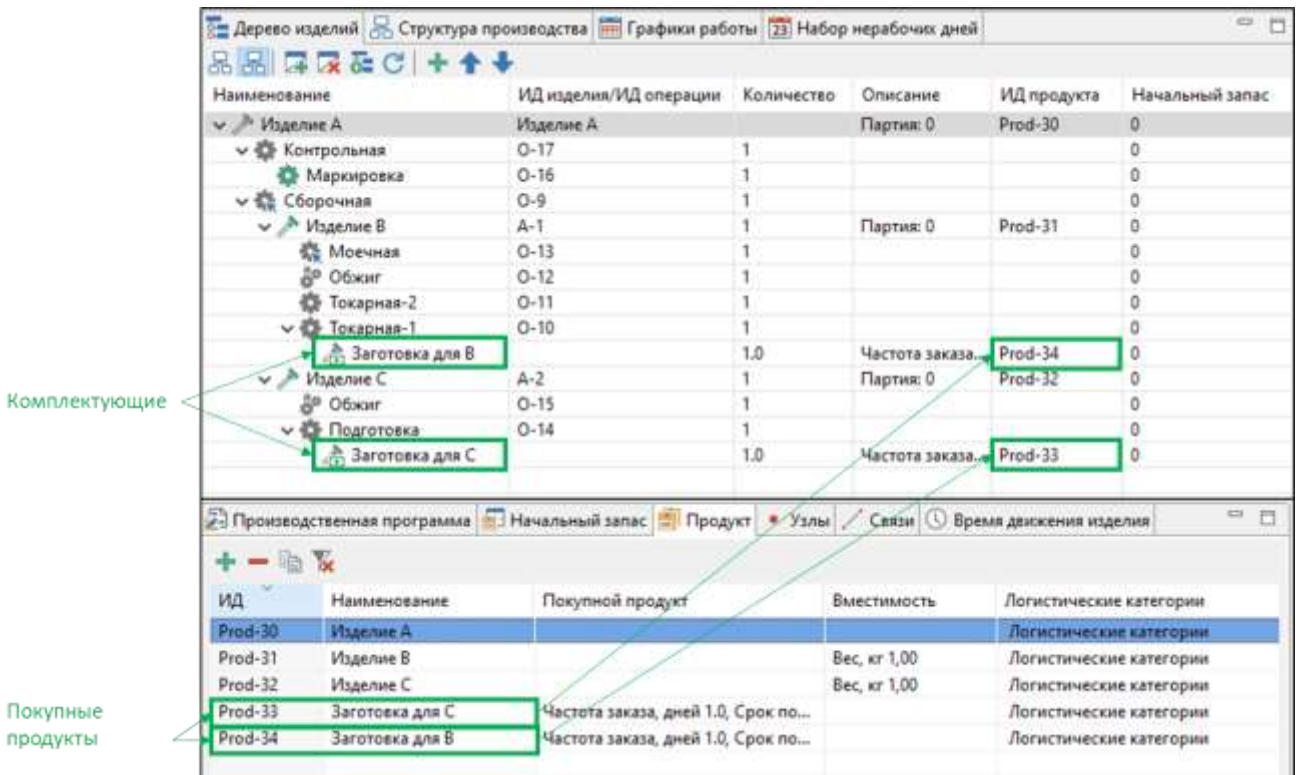
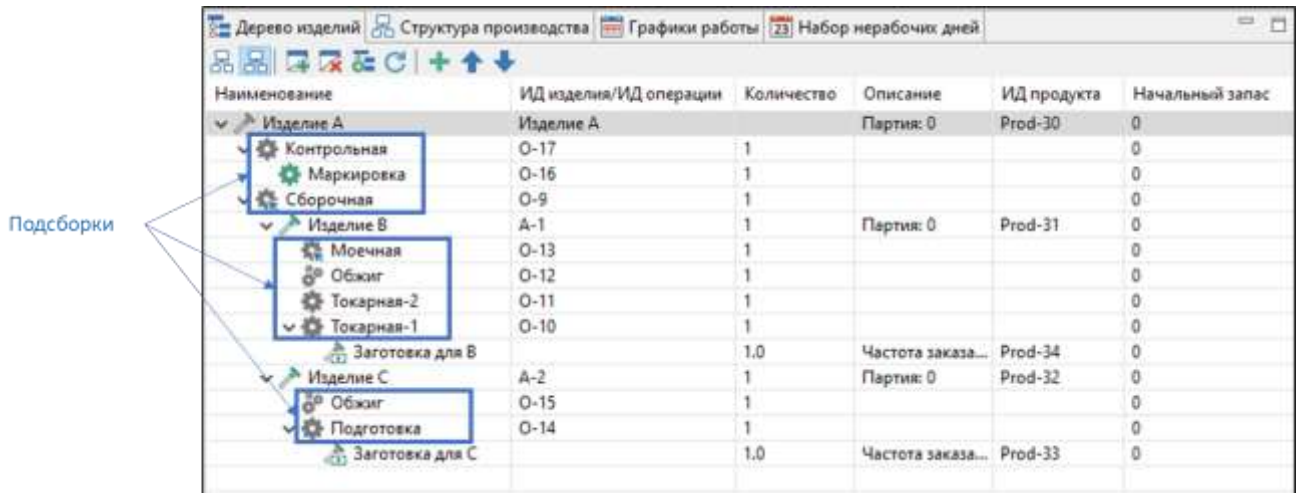


Рис. 3. Комплектующие в дереве изделий



Наименование	ИД изделия/ИД операции	Количество	Описание	ИД продукта	Начальный запас
Изделие А	Изделие А		Партия: 0	Prod-30	0
Контрольная	O-17	1			0
Маркировка	O-16	1			0
Сборочная	O-9	1			0
Изделие В	A-1	1	Партия: 0	Prod-31	0
Моечная	O-13	1			0
Обжиг	O-12	1			0
Токарная-2	O-11	1			0
Токарная-1	O-10	1			0
Заготовка для В		1,0	Частота заказа...	Prod-34	0
Изделие С	A-2	1	Партия: 0	Prod-32	0
Обжиг	O-15	1			0
Подготовка	O-14	1			0
Заготовка для С		1,0	Частота заказа...	Prod-33	0

Рис. 4. Подборки в дереве изделий

На любом этапе подборки в дерево изделий может быть добавлено комплектующее, изделие или операция.

### 2.2.6. Логистические категории

Для расчета времени перемещения изделий используются логистические категории. Примерами логистических категорий могут быть «Масса от 1 кг до 10 кг», «Объем до 0.1 м<sup>3</sup>» и т.д. Для каждого продукта может быть заданы одна или несколько логистических категорий.

### 2.2.7. Типы вместимости

Для целей моделирования вместимости используются типы вместимости. Примерами типов вместимости могут быть «Вес», «Ширина» и т.д.

### 2.2.8. Коэффициенты использования вместимости

Для продуктов может задаваться коэффициент использования вместимости, показывающий, сколько единиц вместимости требуется для хранения одной единицы продукта. Коэффициент использования вместимости продукта, его «размер» указывается в разрезе типов вместимости. Например, коэффициент использования вместимости изделия А по типу «Вес, кг» составляет 10 кг, по типу «Длина, м» - 0,8 метров.

## 2.3. Производственные мощности

### 2.3.1. Производственные центры (ПЦ)

Производственный центр – объект, на котором производятся операции по переработке и сборке изделий. Производственный центр может выполнять фиксированный набор операций.

### 2.3.2. Типы производственных центров

Тип ПЦ – сущность, используемая для группировки однотипных ПЦ при задании данных и отображении статистики. Производительность и множество возможных операций задается в разрезе типов ПЦ.

### 2.3.3. Расписания работы ПЦ

Производственные центры работают по заданному графику. График определяет периоды плановой доступности и недоступности ПЦ. График работы ПЦ задается как повторяющееся множество периодов доступности ПЦ в разрезе дней недели. Пример задания графика работы в две смены при пятидневной рабочей неделе приведен на Рис. 5.

Расписание	Смена	День недели начала	Время начала	День недели конца	Время конца
schedule	shiftName	beginWeekDay	beginTime	endWeekDay	endTime
2 смены 5 дней	1	ПН	8:00	ПН	12:00
2 смены 5 дней	1	ПН	13:00	ПН	17:00
2 смены 5 дней	2	ПН	18:00	ПН	22:00
2 смены 5 дней	2	ПН	23:00	ВТ	3:00
...					
2 смены 5 дней	1	ПТ	8:00	ПТ	12:00
2 смены 5 дней	1	ПТ	13:00	ПТ	17:00
2 смены 5 дней	2	ПТ	18:00	ПТ	22:00
2 смены 5 дней	2	ПТ	23:00	СБ	3:00

Рис. 5. Пример задания расписания в две смены при пятидневной рабочей неделе

Отдельно задаются наборы нерабочих (праздничных) дней как множество дат, в течение которых ПЦ недоступен вне зависимости от графика.

В каждый момент времени ПЦ может работать в соответствии с одним графиком и одним набором нерабочих дней.

### 2.3.4. Плановые периоды недоступности ПЦ

Плановый ремонт – запланированная остановка ПЦ для выполнения плановых текущих, капитальных или иных ремонтных работ. Ввод и вывод ПЦ из эксплуатации также задается плановыми периодами недоступности.

### 2.3.5. Ремонты по наработке

Ремонт по наработке – ремонт, который выполняется по достижении ПЦ заданного количества часов наработки двигателя/ ударного механизма.

### **2.3.6. Поломки ПЦ**

Для моделирования аварийных выходов ПЦ из строя используются поломки – незапланированные остановки ПЦ. Время наступления поломки может задаваться исходя из календарного времени, времени работы ПЦ (выполнения операций, наладок и разналадок) или времени выполнения операций.

### **2.3.7. Накопители**

Накопитель – объект, в котором осуществляется хранение единиц продукции во время, когда они не обрабатываются на ПЦ и не перемещаются по территории предприятия.

Вместимость накопителя определяется в разрезе типов вместимости. Для каждого накопителя задается вместимость только одного типа, являющегося для накопителя ограничивающим фактором. Например, накопитель может быть большим по размеру, но иметь ограничения по весу вмещаемых изделий. В этом случае для накопителя будет задан тип вместимости «Вес» и значение вместимости в единицах измерения веса.

### **2.3.8. Внешние подрядчики**

Внешний подрядчик — объект, на котором так же, как и на ПЦ, могут выполняться операции по переработке и сборке изделий.

## **2.4. Основные данные производства**

### **2.4.1. Операции**

Производственная операция — часть технологического процесса, выполняемая на одном ПЦ, состоящая из ряда действий над изделием или группой совместно обрабатываемых изделий. Каждая операция может выполняться на ПЦ одного или нескольких типов. Продолжительность выполнения операции может различаться в зависимости от типа ПЦ.

Одиночные операции выполняются одновременно над одним изделием.

Групповая операция выполняется одновременно над несколькими изделиями одного или разных типов.

Операция подрядчика выполняется сторонними организациями, без использования производственных мощностей моделируемого предприятия.

Операции над одним изделием могут выполняться последовательно и параллельно. Так, в дереве изделий, показанном на Рис. 6, последняя (корневая) операция «Контрольная» может выполняться только после завершения сборочной

операции и маркировки, при этом операции сборочная и маркировка могут выполняться одновременно.

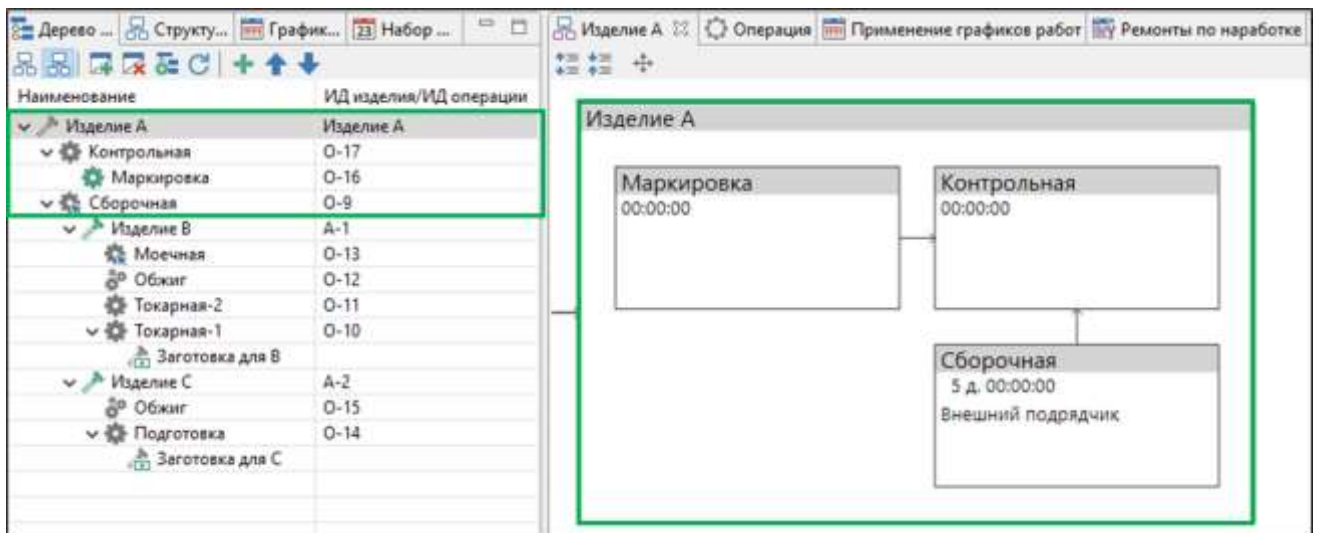


Рис. 6. Последовательные и параллельные операции в дереве изделий

#### 2.4.2. Производительность ПЦ

Запись о производительности ПЦ при выполнении одиночной операции определяет длительность выполнения операции над одним изделием в зависимости от типа ПЦ.

Запись о производительности ПЦ при выполнении групповой операции определяет длительность выполнения операции одновременно над группой изделий в зависимости от типа ПЦ.

При смене операций на ПЦ могут требоваться дополнительные действия по замене оснастки, очистке и т.п. Для моделирования времени, требуемого для таких дополнительных действий, в модели используются наладки и разналадки. Наладка ПЦ в модели – задержка на заданное время перед выполнением операции, при условии, что до этого выполнялась другая операция или производился ремонт ПЦ. Разналадка – задержка для выполнения заключительных действий после окончания выполнения операции, при условии, что после нее будет выполняться другая операция или ремонт ПЦ.

#### 2.4.3. Производительность внешних подрядчиков

Для операции, выполняемой сторонними организациями, указывается производительность внешнего подрядчика, т.е. длительность выполнения операции внешним подрядчиком.

#### **2.4.4. Начальный запас**

Начальный запас – это покупные продукты и под сборки (изделия в разной степени обработки), имеющиеся в накопителях на момент начала моделирования.

#### **2.4.5. Покупной продукт**

Некоторые продукты, используемые в производстве готового изделия, могут быть покупными. Для них должны быть указаны параметры поддержания запаса: частота заказа, срок поставки, минимальный размер партии, кратность заказа и страховой запас.

### **2.5. Структура производства**

Система позволяет задать структуру предприятия или группы предприятий. Структура производства является иерархической и состоит из организационных единиц. Каждая организационная единица может содержать одну или несколько вложенных организационных единиц. Иерархическая структура древовидна – каждая организационная единица может принадлежать только одной родительской организационной единице. При этом корневая единица не имеет родительской единицы. Структура производства имеет только один корневой элемент.

Организационные единицы используются для группировки ПЦ, накопителей и ресурсов. Все объекты (ПЦ, накопители, ресурсы) могут располагаться только на нижнем (терминальном) уровне иерархии.

### **2.6. Ресурсы**

В PlantTwin реализован учет ресурсов (персонала, оснастки и т.д.), необходимых для выполнения той или иной операции. Для каждой записи о производительности, т.е. пары операции и типа ПЦ, может быть задан один или несколько альтернативных наборов ресурсов. Выбор любого из альтернативных наборов ресурсов не влияет на длительность выполнения операции. Операция может начать выполняться, только если доступен некоторый набор ресурсов.

Набор ресурсов – сущность, задающая множество типов ресурсов, необходимых для выполнения операции. Примером набора ресурсов является: один фрезеровщик 6 разряда + 2 наладчика. Указание ресурсов не является обязательным.

Единицы ресурсов используются по заданному графику. График работы определяет периоды плановой доступности и недоступности единиц ресурсов.

Ресурсы задаются в разрезе организационных единиц. Каждая единица ресурсов может использоваться только на ПЦ, принадлежащих ее организационной единице.

## **2.7. Производственная программа**

Производственная программа задает целевой график производства готовых изделий – в ней указывается, сколько каких изделий и в какой срок должно быть произведено.

## **2.8. Транспортная сеть**

### **2.8.1. Узлы транспортной сети**

Узел транспортной сети соответствует точке на двухмерном плане предприятия. Каждый ПЦ и накопитель привязан ровно к одному узлу. При этом к одному узлу может быть привязано несколько объектов (ПЦ или накопителей).

### **2.8.2. Транспортные связи**

Транспортная связь связывает два узла транспортной сети. Все транспортные связи являются двунаправленными. Все перемещения по транспортным связям выполняются по прямой от одного узла к другому.

## 3. Моделируемые процессы и алгоритмы

### 3.1. Алгоритм планирования

#### 3.1.1. Общая концепция алгоритма планирования

Планирование выполнения производственной программы заключается в определении времени начала и окончания выполнения всех необходимых операций на производственных центрах, а также времени закупки покупных комплектующих и количества их закупки.

Работа ПЦ планируется с помощью расстановки слотов на временной оси. Слот – непрерывный временной промежуток, в течение которого ПЦ находится в одном состоянии. Слоты могут быть следующих типов:

- Период вне расписания (например, время обеда или выходные дни)
- Плановый ремонт
- Работа
  - Выполнение операции
  - Наладка
  - Разналадка

Пример временной оси ПЦ с расставленными на ней слотами показан на Рис. 7.

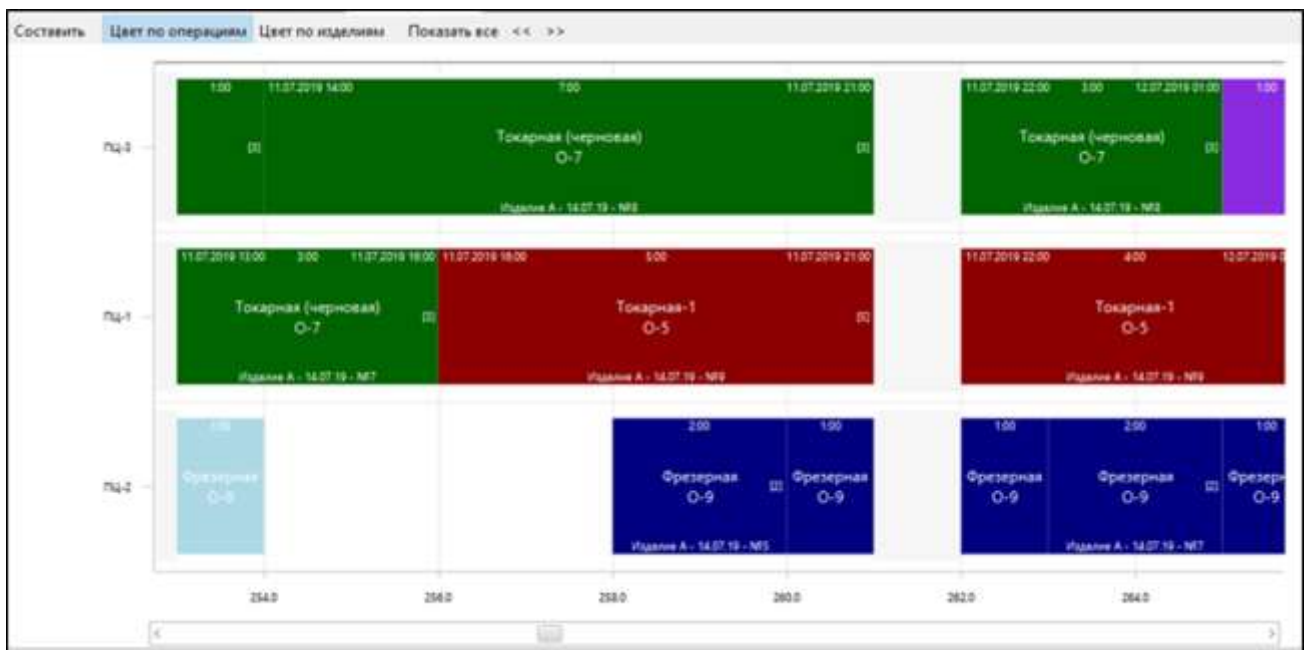


Рис. 7. Пример временной оси ПЦ со слотами



Закупка покупных комплектующих планируется на основании графика потребности в предположении об отсутствии ограничений у поставщиков на количество поставляемых товаров.

В ходе планирования слоты расставляются в обратном порядке, начиная со слотов последних операций, необходимых для производства конечных изделий производственной программы. Например, если для производства изделия А требуется сначала произвести изделия В и С, то сначала будет запланировано производство изделия А, а затем – производство изделий В и С к дате начала работ над изделием А. Такой подход позволяет избежать неопределенности времени постановки слота, которая возникла бы при планировании «вперед», то есть от наиболее глубоких элементов дерева изделий (Рис. 8). При обратном планировании неопределенность устраняется с помощью предположения о том, что изделие можно произвести к заданной дате. Таким образом, в ходе планирования временные оси ПЦ заполняются слотами в направлении справа налево, то есть от более поздних операций к более ранним.

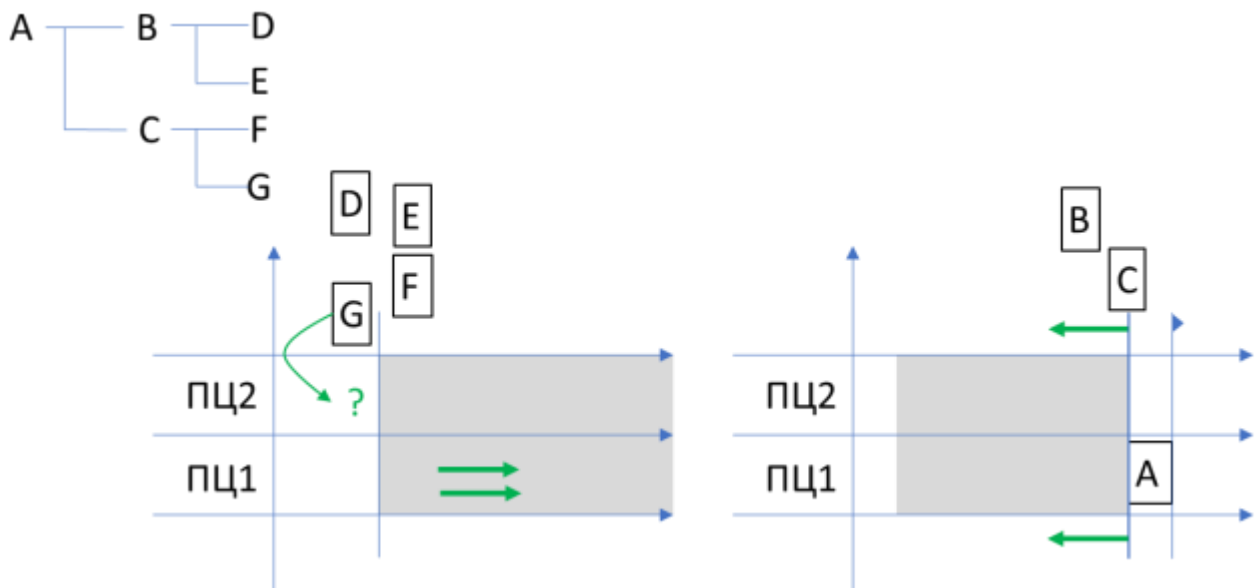


Рис. 8. "Прямое" и "обратное" планирование

Планирование выполняется пошагово, на вход каждого следующего шага передаются слоты, запланированные на всех предыдущих шагах. В результате выполнения каждого шага всегда планируется выполнение одной операции, однако количество новых слотов может быть любым, в частности:

- 0 слотов, если выполнение операции запланировано с помощью привлечения внешнего подрядчика
- 1 слот – самый очевидный случай – для выполнения операции достаточно 1 временного промежутка, наладка и разналадка не требуются

- Более 1 слота – длительность выполнения операции больше, чем свободный промежуток ПЦ. Например, ПЦ работает по 8 часов в сутки, а длительность операции составляет 20 часов. Тогда будет запланировано не менее трех слотов выполнения операции. Кроме того, дополнительные слоты могут быть запланированы для выполнения наладки и разналадки

Альтернатива планирования – это совокупность операции и одного ПЦ или подрядчика, с помощью которого эта операция может быть выполнена. Например, если операция X может быть выполнена на ПЦ1 и ПЦ2, то это значит, что могут существовать две альтернативы планирования: (X, ПЦ1) и (X, ПЦ2). На каждом шаге планирования генерируются все альтернативы, выбирается одна из них, и расставляются слоты на осях ПЦ в соответствии с выбранной альтернативой. Планирование заканчивается, когда множество альтернатив пусто.

После завершения построения плана в обратном порядке (планирования «назад») на основании полученного плана строится план «вперед» с соблюдением выстроенной последовательности операций. При построении плана «вперед» также генерируются альтернативы и выбираются лучшие.

Из двух полученных планов (плана «назад» и плана «вперед») выбирается лучший по следующим условиям:

1. План сгенерирован полностью (запланированы все необходимые операции)
2. Меньший критический путь всей производственной программы
3. Более ранняя дата выполнения производственной программы.

### **3.1.2. Описание алгоритма планирования**

В процессе алгоритма планирования выполняется следующая последовательность действий:

1. Расставить слоты периодов недоступности и периодов вне расписания для всех ПЦ
2. Сгенерировать начальное множество альтернатив на основе последних операций, необходимых для выполнения производственной программы, а также доступности ресурсов для выполнения соответствующих операций
3. Повторять действия 3.1 – 3.6, пока множество альтернатив не пусто
  - 3.1. Выбрать одну альтернативу из множества
  - 3.2. Если не удалось выбрать альтернативу, перейти на шаг 4
  - 3.3. Удалить из множества все альтернативы для выбранной операции
  - 3.4. Если альтернатива подразумевает выполнение на ПЦ, то
    - 3.4.1. Добавить на ось ПЦ все слоты, необходимые для выполнения операции, иначе
    - 3.4.2. Запланировать выполнение операции внешним подрядчиком

- 3.4.3. Для каждой единицы ресурсов, участвующей в операции, отметить период выполнения операции как недоступный
- 3.5. Добавить потребность в покупных комплектующих на время начала запланированной операции
- 3.6. Дополнить множество альтернатив новыми, образовавшимися в результате выполнения выбранной операции. Новые альтернативы формировать с учетом доступности ресурсов для выполнения соответствующих операций
4. Рассчитать график закупок покупных комплектующих на основании графика потребности и параметров пополнения

Действия 1 и 2 – предварительные действия, выполняемые однократно в начале планирования. Действия 3.1 – 3.6 – действия шага планирования. Действие 4 – завершающее действие планирования. Если по завершении работы алгоритма планирования были запланированы все необходимые операции, то планирование считается завершенным успешно.

Работа алгоритма планирования определяется правилом выбора альтернативы, применяемом в действии 3.1. Правило выбора альтернатив, применяемое в конкретной реализации алгоритма, называется стратегией планирования.

#### *3.1.2.1 Планирование партий запуска*

Планирование партий запуска выполняется поэтапно – этапы с планированием операций без ограничений по минимальной партии запуска чередуются с формированием графика выпуска партий для некоторого изделия.

При планировании партий действуют следующие ограничения:

- Партия планируется как непрерывная последовательность шагов, не прерываемая планированием других операций
- Все операции партии выполняются на одном ПЦ
- Все комплектующие, необходимые для производства изделий партии, должны быть произведены или закуплены к моменту выполнения первой операции партии
- Каждая последующая операция над изделиями одной партии выполняется только после завершения предыдущей операции над всеми изделиями партии.

#### **3.1.3. Критерии выбора альтернатив**

При выборе каждой следующей альтернативы выбирается первая из списка всех альтернатив, отсортированных последовательно множеству критериев. Последовательная сортировка – это поочередное упорядочение альтернатив по упорядоченному списку критериев. Альтернативы, соответствующие одному и тому же значению предыдущего критерия, упорядочиваются по следующему критерию

и т.д. Последним критерием всех стратегий является порядковый номер альтернативы, что позволяет сделать планирование воспроизводимым. Список критериев сортировки альтернатив приведен ниже:

1. Тип выполнения операций (сначала планируются альтернативы, соответствующие выполнению внешними подрядчиками, затем – собственными ресурсами)
2. Альтернатива продолжает начатую партию запуска (альтернативы, продолжающие партии запуска, получают больший приоритет)
3. Порядковый номер начатой партии запуска (сначала планируются альтернативы, соответствующие партиям, начатым ранее)
4. Альтернатива продолжает технологическую партию (альтернативы, продолжающие технологическую партию, получают больший приоритет, затем следуют альтернативы, не требующие группировки в технологические партии, в последнюю очередь – альтернативы, начинающие новые технологические партии)
5. Время завершения операции (сначала альтернативы, имеющие наиболее позднее время завершения при планировании «назад»/ имеющие наиболее раннее время завершения при планировании «вперед»)
6. Общее время ПЦ, требуемое для выполнения альтернативы, с учетом перерывов, выходных, наладок и разналадок (сначала альтернативы с минимальным временем)
7. Время опоздания операции (сначала альтернативы с наименьшим временем опоздания)
8. Количество альтернативных ПЦ, на которых может быть выполнена операция (сначала альтернативы с большим количеством альтернативных ПЦ)
9. Количество операций до корневого элемента производственной программы, т.е. глубина вложенности операции (сначала альтернативы, соответствующие операциям с наименьшей глубиной вложенности) (используется только при планировании «назад»)
10. Плановое время завершения операции (сначала альтернативы, соответствующие операциям с минимальным плановым временем завершения)
11. Порядковый номер альтернативы – необходимо для обеспечения воспроизводимости планирования.

#### **3.1.4. Планирование пополнения покупных продуктов**

Планирование пополнения покупных комплектующих выполняется после окончания выполнения всех шагов планирования на основании потребности в покупных продуктах. Планирование пополнения производится независимо для каждого продукта.

Входной информацией для планирования пополнения продукта является график потребности в данном продукте, а также начальный запас продукта. Также при планировании пополнения учитываются параметры пополнения, установленные для каждого продукта во входных данных:

- уровень страхового запаса;
- кратность поставки;
- минимальный размер заказа;
- максимальная частота заказа;
- плановый срок поставки.

Планирование пополнения выполняется по следующему алгоритму:

1. Установить текущее время планирования  $T$  равным дате начала моделирования
2. Установить текущий запас  $S$  равным начальному запасу
3. По графику потребности определить время  $T_1$ , когда запас  $S_1$ , уменьшаясь, станет меньше страхового запаса  $SS$ . При этом  $S_1$  может быть отрицательным
4. Если время  $T_1 >$  времени окончания моделирования, закончить работу алгоритма
5. Рассчитать размер чистой потребности  $R = SS - S_1$
6. Округлить  $R$  в большую сторону, используя минимальную кратность поставки  $Q$ ,  $R_1 = \text{roundup}( R / Q ) * Q$
7. Рассчитать количество к закупке  $PQ = \max( \text{MOQ}, R_1 )$ , где  $\text{MOQ}$  – минимальный размер заказа
8. Рассчитать скорректированное время заказа  $T_2 = \text{rounddown}( T_1 - LT, OF ) * OF$ , где  $OF$  – частота заказа, а  $LT$  – плановый срок поставки
9. Добавить пару  $(T_2, PQ)$  в график закупок, скорректировать график потребности
10. Перейти на шаг 3

В результате работы алгоритма планирования пополнения для каждого покупного продукта, в котором имеется потребность, рассчитывается график закупок, состоящий из записей  $(T, PQ)$ , где  $T$  – время размещения заказа на закупку, а  $PQ$  – количество заказываемого продукта.

### **3.1.5. Планирование транспортировки изделий**

Логика транспортировки изделий внутри предприятия в планировщике аналогична логике транспортировки изделий в имитационной модели (пп. 3.2.6).

## 3.2. Моделируемые процессы

### 3.2.1. Производство изделий в соответствии с планом

Производство изделий может моделироваться в соответствии с планом, сгенерированным планировщиком PlantTwin, или планом, сформированным внешними системами и импортированным в PlantTwin извне.

Производство изделий выполняется на ПЦ посредством исполнения операций. Процесс производства изделий состоит из следующих шагов:

1. Имитационная модель обращается к плану и формирует последовательность операций для каждого ПЦ согласно плану
2. В процессе моделирования операции над изделием могут начать выполняться ранее плановой даты начала операции, сформированной планировщиком, если для изделия в сценарии задан ранний запуск относительно плановой даты. Например, если плановая дата начала операции O-1 над изделием Izd-1 - 12 марта в 8.00 и в дереве изделий для Izd-1 указан ранний запуск 3 дня, операция O-1 в модели начнет выполняться 9 марта в 8.00.
3. Операция начинает выполняться при соблюдении трех условий:
  - ПЦ, который должен выполнять эту операцию по плану, доступен для работы: не находится на перерыве или ремонте и не выполняет другую операцию
  - Завершены все операции, предшествующие данной операции согласно технологическому процессу, и готовы все необходимые для выполнения операции комплектующие
  - Доступен набор ресурсов, необходимый для выполнения данной операции
4. Если ПЦ недоступен, операция ожидает его освобождения для начала выполнения
5. Если не завершены предшествующие операции согласно технологическому процессу, ПЦ может начать выполнять следующие в очереди операции, но только, если сможет завершить выполнение начатой операции до наступления плановой даты начала выполнения операции, которая ожидает выполнения предшествующих
6. При выполнении операций над партиями обработанные изделия одной партии хранятся в выходном буфере ПЦ до тех пор, пока не соберется партия, после чего вся партия поступает на входной накопитель ПЦ, на котором будет выполняться следующая операция
7. Если недоступны ресурсы, необходимые для выполнения операции, ПЦ находится в состоянии ожидания ресурсов.

### **3.2.2. Работа производственных центров**

#### *3.2.2.1 Работа ПЦ по расписанию*

Производственные центры работают по заданному расписанию. Расписание определяет периоды плановой доступности и недоступности ПЦ.

При определении множества периодов доступности ПЦ для работы используются следующие правила:

- Активные периоды работы ПЦ могут не ограничиваться рамками одних суток
- Активные периоды работы ПЦ не могут переходить через границу недели, то есть не могут содержать в себе момент времени, соответствующий 00:00 понедельника
- Нерабочие (праздничные) дни отменяют только те активные периоды, начало которых приходится на период нерабочего (праздничного) дня, при этом активные периоды, начавшиеся ранее, остаются неизменными
- Записи о смене расписания распространяется только на активные периоды, начинающиеся не ранее даты записи, смена расписания ПЦ в течение активного периода невозможна.

Если окончание активного периода пришлось на период выполнения операции, то выполнение операции приостанавливается и возобновляется при начале следующего активного периода.

#### *3.2.2.2 Плановые периоды недоступности*

Плановый ремонт – запланированная остановка ПЦ для выполнения плановых текущих, капитальных или иных ремонтных работ, а также для задания ввода и вывода ПЦ из эксплуатации. Плановые периоды недоступности не прерывают операцию, а наступают после окончания ее выполнения.

Для выполнения плановых ремонтов используется только время активных периодов работы ПЦ.

#### *3.2.2.3 Ремонты по наработке*

Наступление необходимости ремонта по наработке происходит при достижении определенного количества часов наработки ПЦ. При определении количества часов наработки ПЦ учитывается только время, в течение которого ПЦ выполнял операции, наладки и разналадки. Ремонты по наработке не прерывают операцию, а выполняются после окончания ее выполнения.

Если во время ремонта по наработке наступает время планового ремонта, плановый ремонт начинает выполняться сразу после окончания ремонта по наработке.

Для выполнения ремонта по наработке используется только время активных периодов работы ПЦ.

#### 3.2.2.4 Поломки

Поломка – внеплановая (аварийная) остановка ПЦ. Поломки прерывают выполнение операций, а также выполнение плановых ремонтов и ремонтов по наработке.

Для устранения поломок используется все календарное время, вне зависимости от периодов активности ПЦ.

#### 3.2.2.5 Ожидание ресурсов

Если для выполнения некоторой операции требуются ресурсы, то они также требуются для выполнения наладки/ разналадки для этой операции.

Если во время выполнения операции ресурс, выполняющий операцию, становится недоступным согласно его расписанию и нет альтернативных единиц ресурсов, операция приостанавливается и возобновляется в начале следующего активного периода единицы ресурсов.

### 3.2.3. Работа внешних подрядчиков

Работа внешних подрядчиков моделируется задержкой на время выполнения операций в соответствии с расписанием, по которому работает подрядчик.

Для каждого подрядчика в системе задается расписание работы. При возникновении необходимости в выполнении операции внешним подрядчиком операция начинает выполняться в момент ближайшего рабочего периода подрядчика и выполняется только в его активные периоды (аналогично работе ПЦ). Таким образом можно представить работу внешнего подрядчика как бесконечное количество ресурсов, способных выполнять заданные операции в соответствии с расписанием.

### 3.2.4. Хранение изделий в накопителях

Изделия хранятся в накопителях в ожидании обработки на ПЦ или перемещения в другой накопитель. Изделия, являющиеся готовой продукцией, покидают систему сразу после окончания производства, без хранения в накопителях. При хранении изделий в накопителях в каждый момент времени должно соблюдаться условие: сумма коэффициентов вместимостей изделий по заданному для накопителя типу, находящихся в накопителе, не должна превышать вместимость накопителя.

Если вместимость накопителя не задана, предполагается, что она не ограничена, и накопитель может вмещать сколько угодно изделий с любым коэффициентом вместимости.



### **3.2.5. Поступление покупных продуктов на предприятие**

Поступление покупных продуктов на предприятие моделируется задержкой от момента заказа продуктов до появления их в виртуальном накопителе, имеющем неограниченную вместимость.

Время размещения заказа на закупку определяется на основе плана, сгенерированного планировщиком (1).

Время поступления заказанного покупного продукта моделируется с использованием срока поставки, заданного для продукта во входных данных, и вероятностного отклонения от срока поставки.

### **3.2.6. Транспортировка изделий внутри предприятия**

Перемещение изделий внутри предприятия возможно между любыми двумя различными узлами транспортной сети предприятия. Предполагается, что транспортная сеть предприятия образует связный граф, то есть между любыми двумя узлами существует по крайней мере один маршрут.

Траектория перемещения определяется как геометрически кратчайший путь по транспортной сети предприятия. При наличии нескольких кратчайших путей выбирается случайный.

Для расчета времени перемещения изделий используются организационные единицы, к которым относятся ПЦ, и логистические категории продуктов.

Для терминальных узлов организационной структуры задается время перемещения между любыми двумя ПЦ этой организационной единицы, а также перемещения от входа в данную единицу к конкретному ПЦ.

Для нескольких организационных единиц, принадлежащих одной и той же родительской организационной единице, задаются транспортные связи с указанием времени перемещения между соответствующими организационными единицами.

Время перемещения изделий между ПЦ, принадлежащими различным организационным единицам, всегда состоит из 3 компонентов:

- Время движения внутри исходной орг. единицы
- Время перемещения между орг. единицами одного уровня иерархии
- Время перемещения внутри целевой орг. единицы.

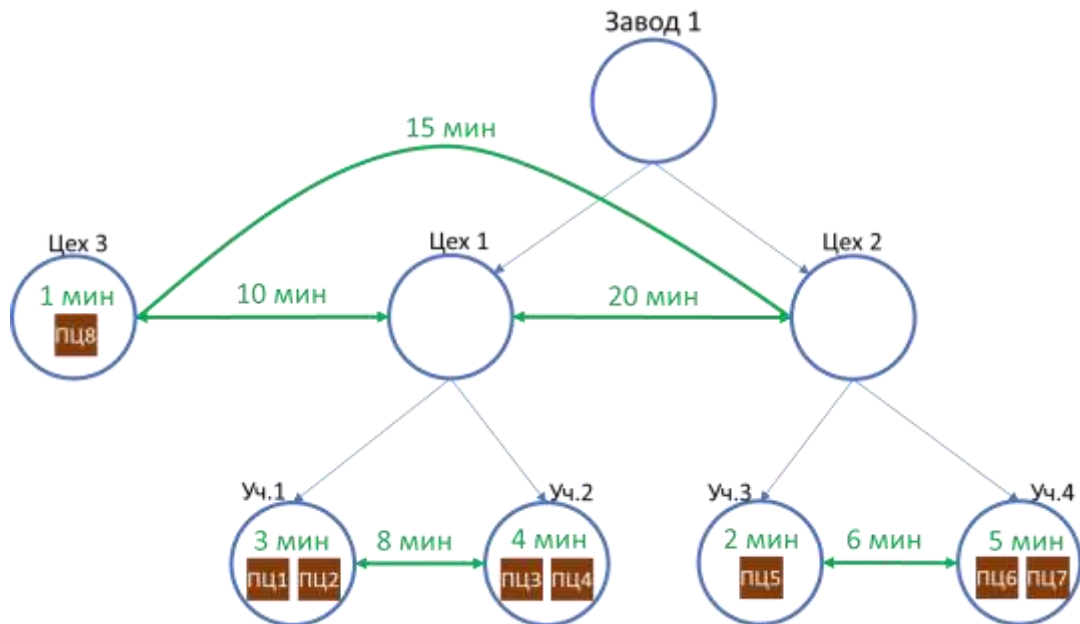


Рис. 9. Время перемещения изделий

Для примера организационной структуры, приведенного на Рис. 9, длительности перемещения изделия между ПЦ будут следующими:

- время перемещения между ПЦ1 и ПЦ2 (внутри участка 1) – 3 мин.
- время перемещения между ПЦ 1 и ПЦ3 (между участками 1 и 2) – 3+8+4 мин.
- время перемещения между ПЦ 1 и ПЦ6 (между цехами 1 и 2) – 3+20+5 мин.
- время перемещения между ПЦ 1 и ПЦ8 (между цехами 1 и 3) – 3+10+1 мин.

Все длительности перемещения задаются в разрезе организационных единиц и логистических категорий. При расчете времени перемещения используется максимальное значение каждого из этапов перемещения.

В случае отсутствия записи о времени перемещения некоторого продукта оно принимается равным нулю.

Движение несимметричное. Это значит, что необходимо задавать движение как от ОЕ1 до ОЕ2, так и обратно - от ОЕ2 до ОЕ1, и это могут быть разные значения.

Для покупных изделий логистические категории не задаются, так как их перемещения не планируются и не моделируются.

### 3.3. Моделирование с перепланированием

Моделирование с перепланированием выполняется так же, как стандартное моделирование PlantTwin, но в моменты возникновения ремонтов по наработке или поломки любого ПЦ моделирование прекращается и запускается

генерирование нового плана с учетом текущего состояния моделируемой системы. После этого моделирование продолжается в соответствии с новым планом.

### **3.4. Моделирование из внешнего плана**

Режим моделирования из внешнего плана позволяет выполнять моделирование с использованием ранее сохраненного плана, сформированного PlantTwin или другими (внешними) системами планирования.

### **3.5. Сценарный анализ**

Сценарный анализ позволяет одновременно запустить моделирование нескольких сценариев и сравнить результаты их моделирования в одном окне.

### **3.6. Эксперимент Монте-Карло**

Анализ по методу Монте-Карло позволяет одновременно запустить несколько итераций моделирования одного и того же сценария с применением различных значений случайных величин, а затем сравнить результаты в одном окне.


## 4. Выходные данные

### 4.1. Данные визуализации планировщика и имитационной модели

Планировщик и имитационная модель содержат динамическую визуализацию, позволяющую визуально оценить сгенерированный план, отслеживать его выполнение и моделирование работы ПЦ.

Все данные из таблиц данных планировщика и имитационной модели можно скопировать в Excel для последующего анализа.

### 4.2. Отчеты и логи

После завершения выполнения имитационного эксперимента и закрытия окна выполнения модели данные о результатах моделирования сохраняются в результирующий отчет в формате Excel и в папку  logs в виде файлов логов в текстовом формате. Каждый лог в текстовом формате можно открыть с помощью Excel и посмотреть детальную информацию о ходе выполнения модели.

#### 4.2.1. Результирующий отчет

Результирующий отчет содержит данные об основных результатах моделирования и состоит из следующих листов:

- Лист «Эксперимент», содержащий название модели, название проекта, название и путь расположения файла сценария и т.д.
- Лист «Производственные заказы», содержащий данные о выполнении производственных заказов
- Лист «Состояния ПЦ за период», содержащий данные о состоянии и загрузке производственных центров за весь период моделирования
- Лист «Загрузка ПЦ по месяцам», содержащий данные о загрузке производственных центров по месяцам

#### 4.2.2. Файлы логов

Файлы логов – текстовые файлы, содержащие низкоуровневую информацию о ходе моделирования. Файлы логов могут быть использованы для построения детализированных отчетов, отображающих динамику моделирования и структуру высокоуровневых показателей функционирования производственного предприятия. Файлы логов генерируются моделью в момент завершения соответствующего эксперимента.