

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

П.А. Русских, Д.В. Капулин

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Имитационное моделирование является одним из эффективных методов среди доступных для оценки параметров или численных характеристик организационно-технических систем. Создание адаптивной системы производственного планирования направлено на ежедневное принятие оперативных решений на уровне цеха, прогнозирования доступности оборудования, оценки производительности и устранения узких мест. Известные исследования по устранению узких мест делают упор на анализе данных физического цеха либо же наоборот – только на использовании смоделированных данных. Сочетание реальных и смоделированных данных позволяет, с одной стороны, получить больше информации для прогнозирования доступности каждого рабочего места, с другой стороны, позволяет осуществить оценку производительности для перепланирования с использованием имитационной модели. **Цель исследования:** исследование процесса планирования производства с помощью имитационного моделирования для оценки его параметров: загрузка рабочих мест, длина очереди на обработку заказа, время нахождения заказа как в очереди, так и в производственной системе. **Материалы и методы.** В статье представлена мультиагентная имитационная модель для каждого рабочего места в цехе, исследуется загрузка цеха, оценивается производительность рабочих мест. Предлагается подход к оптимальной загрузке производственных мощностей. В качестве примера, иллюстрирующего эффективность и преимущество предлагаемой модели, взят процесс производства радиоэлектронной аппаратуры в сборочном цехе. **Результаты.** Сформулирована задача оптимального позаказного мелкосерийного планирования. Разработана мультиагентная модель для исследования мелкосерийного позаказного производства. Модель предусматривает интеграцию средств имитационного моделирования с системами оперативного планирования на уровне данных. **Заключение.** Предложенная в исследовании модель позволяет многономенклатурным мелкосерийным производствам планировать количество рабочих мест и выявлять «узкие» места. Применение комбинации инструментов имитационного моделирования и планирования позволяет обеспечивать управление ресурсами предприятия с учетом динамических изменений в системе.

Ключевые слова: мелкосерийное производство, позаказное производство, инструменты планирования, методы имитационной оптимизации.

Введение

За последние десятилетия производственный сектор в целом претерпел значительные изменения с точки зрения масштабов, сложности и технологий, и это относится к большинству современных высокотехнологичных производств, таких как электроника, полупроводниковая, аэрокосмическая и автомобильная промышленность. Чтобы оставаться конкурентоспособными, производители должны производить высококачественную продукцию по низким ценам и в то же время сохранять достаточную гибкость и удовлетворять быстро меняющиеся требования клиентов. Оперативное планирование производства связано с решением задач оптимизации. Это многомерные задачи, в процессе решения которых должны быть распределены задания (операции) по имеющимся рабочим местам в доступные временные интервалы с учетом ограничений на продолжительность изготовления продукции [1]. Классические подходы для оперативного планирования делают допущение, что рабочие места (машины) всегда доступны в горизонте планирования и рассчитывают только атрибуты производственных заказов: срок выполнения, время обработки, дату выпуска. Однако эти допущения неосуществимы, поскольку на реальном производстве всегда существуют неопределенности и изменения [2].

Для решения этой проблемы применяются методы динамического планирования, из которых наиболее распространенным подходом является прогнозно-реактивное планирование [3]. Данный

подход предполагает, что сначала строится начальное расписание, а затем каждый раз оно пересчитывается, как только появляется какое-то изменение. Для динамического планирования недоступность рабочих мест и другие нарушения (неопределенность сроков, срочность заказа, изменение времени обработки) всегда относятся к неопределенностям, которые могут вызвать ухудшение производительности планирования и даже сбой в производстве. Можно сказать, что принципы динамического планирования достаточно эффективны для поточных производств с предсказуемым спросом [4]. В случае многономенклатурного мелкосерийного производства решение задачи оперативного планирования является сложной многомерной задачей и применение типовых программных продуктов и методов затруднено [5]. От эффективного решения задачи оптимизации производственного плана зависят такие параметры, как загрузка оборудования, время изготовления одной детали, себестоимость изготовления [6]. Необходимость постоянного итеративного пересчета ранее принятых решений в ответ на происходящие на производстве изменения усложняет задачу оперативного планирования, процесс становится малоэффективным и отнимает много времени.

С развитием средств моделирования все чаще имитационные модели производственных процессов используются для преодоления трудностей оперативного планирования. Модель можно использовать для прогнозирования, визуализации, интеграции данных или информации. Но при этом большинство таких моделей не учитывают требования реальности и оперируют только аналитическими данными [7]. Подход, сочетающий в себе применение реальных данных, полученных с производства, и моделирование, позволяет точно спрогнозировать доступность рабочих мест с учетом распределения их загрузки в режиме, близком к реальному времени. Для этого следует предусмотреть набор методов и поддерживающих инструментов для анализа и принятия решений в отношении распределения ресурсов. Кроме того, необходимо предусмотреть интеграцию средств имитационного моделирования с системами оперативного планирования на уровне данных.

1. Постановка задачи планирования

В контексте промышленного производства термины «Единичное производство» и «Мелкосерийное производство» основаны на количестве изделий на партию и частоте повторения заказов в год. Среднее количество для мелкосерийного производства составляет около 50 изделий на партию, которые производятся менее 12 раз в год [8]. Компании, изготавливающие поставляемую на склад продукцию, чаще всего выпускают стандартную продукцию без какого-либо учета требований заказчика. При изготовлении на заказ влияние клиента на продукт является существенным, что в итоге приводит к большему числу номенклатуры и вариации изделий. При этом объем выпускаемой продукции на единицу номенклатуры значительно меньше, чем при производстве на склад [9].

Проблема планирования для многономенклатурных производств состоит в разнородной среде заказов [10]. Каждый заказ включает в себя различные сборочные работы, которые не могут быть унифицированы для разных изделий, производство которых требует как внутренних изготовленных деталей, так заблаговременной закупки составных частей. Главная сложность состоит в координации процессов изготовления и сборки в условиях ограниченных мощностей так, чтобы минимизировать стоимость всей производственной цепочки. Постоянное изменение объемов производства и комплектующих приводит к неравномерному и малоэффективному использованию мощностей предприятия. Представим полный цикл производства при изготовлении на заказ с четырьмя уровнями: заказчики, сборка, изготовление и поставщики. На уровне клиента есть несколько заказов с конкретными сроками оплаты. Каждый заказ представлен на уровне сборки как набор работ, которые ограничены технологическим приоритетом. Предшествуют сборке закупка у поставщика комплектующих и производство собственных деталей. Целью оптимизации является производственный план, позволяющий минимизировать затраты и соблюсти дату поставок.

Пусть $A \geq 0$ различных заказов, где заказ $a = 1, \dots, A$ имеет срок выполнения $d_a \geq 0$. Этот заказ a состоит из сборочных работ $j = s_a, \dots, e_a$. Число всех сборочных работ $J = e_a$. За счет агрегации каждое сборочное задание j представляет собой набор операций. Сборочные работы j имеют время обработки $p_j \geq 0$ и требуют $c_{j,r} \geq 0$ доступности разных типов оборудования для

выполнения операции без прерывания работы. Множество типов оборудования, участвующего в сборке $r = 1, \dots, R^A$, имеет доступность $C_{r,t}^A$ в момент времени $t \geq 0$. Сборочные задания взаимосвязаны в виде сети, где каждая работа j связана с набором непосредственно предшествующих заданий P_j . Старт сборочных работ в момент времени t определяет потребность на собственные произведенные детали и на внешние закупленные. Стоимость хранения всех деталей, собранных по заданию j , равно h_j^A . Графически заказы, сроки, сборочные работы с их технологическим приоритетом задаются графом сборки, где каждое задание сборки j изображается вершиной, а каждое отношение связи между сборочной работой h и его непосредственным преемником j изображается дугой $h \rightarrow j$ с весом $t_{h,j}^{\min} = 0$.

График сборки определяет поэтапный спрос на типы деталей, которые должны либо производиться на собственном производстве, либо закупаться у сторонних поставщиков. Типы деталей собственного производства $I \geq 0$ и количество деталей каждого типа $i = 1, \dots, I$, необходимых для сборочных работ j , это $q_{j,i} \geq 0$. Собственное производство включает R^F различных производственных единиц. Производственная единица может быть как участком, цехом, набором идентичных машин, так и единственным оборудованием. Производственная единица $r = 1, \dots, R^F$ за период t имеет доступность $C_{r,t}^F \geq 0$, где период времени t – промежуток времени между $t = 1$ и t . Период может составлять от одного дня до недели. Каждая деталь типа $i = 1, \dots, I$ изготавливается исключительно производственной единицей $r_i^F \in \{1, \dots, R^F\}$ в рамках одноуровневого производственного процесса. Для производства одной детали i требуется доступность c_i . В течение каждого периода производится деталь i с фиксированными затратами на переналадку s_i . Чтобы осуществить выполнимость производственных планов, установим доступный период производственных единиц $C_{r,t}^F$, не равный общей доступности, уберем часть доступной мощности, чтобы оставить неиспользуемый производственный потенциал. Производство одной единицы за период $\tau < t$ по спросу в период t требует издержек по хранению запасов h_i^F за период. Комплекующие, закупленные у внешних поставщиков, должны быть в наличии до начала этапа сборки. Издержки по хранению всех деталей, которые закупаются для этапа сборки j , равны h_j^F .

На рис. 1 приведен пример графа сборки, где число заказов $A = 2$, сроки выполнения $d_1 = 5$ и $d_2 = 3$. Время обработки заказа p_j и доступность оборудования $c_{j,1}$ по ресурсу $R^A = 1$ даны над узлами графа. Задания для каждого заказа заключены в пунктирный прямоугольник, т. е. заказ $a = 1$ состоит из сборочных работ 1, ..., 3 и $s_1 = 1, e_1 = 3$, а заказ $a = 2$ состоит из 4 сборочных работ и $s_2 = e_2 = 4$. Доступность производственных единиц для сборочных и производственных работ равны $C_{1,t}^A = 3$ и $C_{1,t}^F = 10$ для каждого момента времени t . Количество изготовленных типов деталей $I = 3$ без внешних закупленных деталей. Доступность производственного оборудования, затраты на переналадку и стоимость хранения трех типов внутренних сборных деталей равны $C^F = (1,1,1), s = (20, 10, 10)$ и $h^F = (1, 2, 1)$ соответственно.

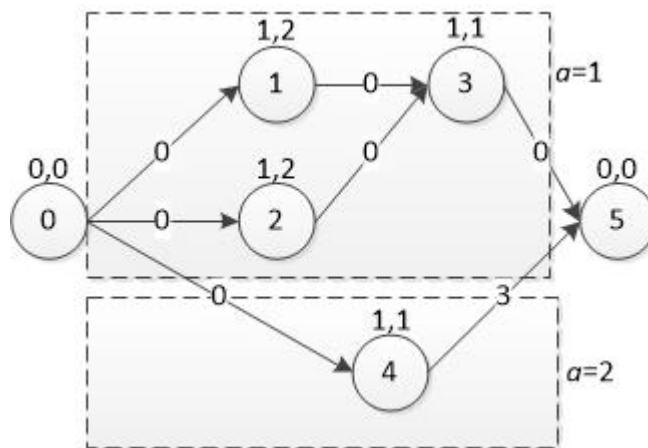


Рис. 1. Граф сборки заказа
Fig. 1. Assembly graph of order

2. Подход к оптимизации

Задачу планирования неоднородной производственной системы мелкосерийного производства можно сформулировать как необходимость планирования одновременно большого числа заказов с учетом ограничения мощностей с одной стороны и одновременной калибровки объема партии изготовления таким образом, чтобы общие затраты на производство были сведены к минимуму [11]. Для реализации принципов адаптивного планирования производства необходимо создание интегрированной модели, обладающей следующим функционалом:

- 1) оперативное планирование этапа сборки;
- 2) координация изготовления и сборки;
- 3) определение размера партии для этапа производства;
- 4) минимизация затрат на хранение и настройки всей производственно-сбытовой цепочки.

Чтобы смоделировать комплексную задачу сборки и изготовления, введем следующие переменные. Для сборки есть двоичная переменная $x_{j,t}$, равная 1, если сборочное задание j начинается в момент времени t , и 0 – в противном случае. Можно уменьшить количество искомым переменных путем расчета для каждого сборочного задания j времени начала работ ES_j и времени завершения работ $E = LS_j$ с помощью прямой и обратной рекурсии от $t = 0$ и d^{\max} соответственно. Для производственного этапа используем переменную $Q_{i,t} \geq 0$, которая показывает количество деталей типа i , произведенных за период t и переменную $I_{i,t} \geq 0$, равную запасам деталей типа i на конец периода t . Переменная $y_{i,t}$ равна 1, если деталь типа i произведена в период времени t , и 0 – в противном случае.

Теперь можно моделировать интегрированную задачу оперативного планирования с одновременным определением оптимальной производственной партии.

Минимизировать:

$$Z = \sum_{a=1}^A \sum_{j=s_a}^{e_a} h_j^A (d_a + 1 - \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t \cdot x_{j,t}) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=0}^T (h_i^F \cdot I_{i,t} + s_i \cdot y_{i,t}). \quad (1)$$

При условии:

$$\sum_{t=ES_j}^{LS_j} (t + p_{e_a}) x_{e_a,t} \leq d_a \quad (a = 1, \dots, A), \quad (2)$$

$$\sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{j,t} = 1 \quad (j = 1, \dots, J), \quad (3)$$

$$\sum_{t=ES_h}^{LS_j} (t + p_h) x_{j,t} - \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t x_{j,t} \leq -t_{h,j}^{\min} \quad (j = 1, \dots, J; h \in P_j), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=\max\{0, t-p_j\}}^{t-1} c_{j,r} x_{j,r} \leq C_{r,t}^A \quad (r = 1, \dots, R^A; t = 1, \dots, T), \quad (5)$$

$$I_{i,t-1} + Q_{i,t} - \sum_{j=1}^J q_{j,i} x_{j,t} = I_{i,t} \quad (i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T), \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I |r_i^F=r| c_i Q_{i,t} \leq C_{r,t}^F \quad (r = 1, \dots, R^F; t = 0, \dots, T), \quad (7)$$

$$y_{i,t} \sum_{j=1}^J q_{j,i} \geq Q_{i,t} \quad (i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T), \quad (8)$$

$$x_{j,t} \in \{0,1\} \quad (j = 1, \dots, J; t = ES_j, \dots, LS_j), \quad (9)$$

$$y_{i,t} \in \{0,1\}, Q_{i,t} \geq 0, I_{i,t} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T). \quad (10)$$

Функция стоимости (1) имитирует общую себестоимость продукции, которая складывается из стоимости производства комплектующих, закупки и сборки (рис. 2) Ограничение (2) гарантирует, что каждый заказ будет завершён не позже установленного срока. Интегрированный граф сборки представлен как ограничения (4) и (5), моделирующие ограничение сборочных мощностей. Уравнение (6) связывает поток деталей между изготовлением и сборкой. Ограничения (7), (8) и (10) моделируют этап производства.

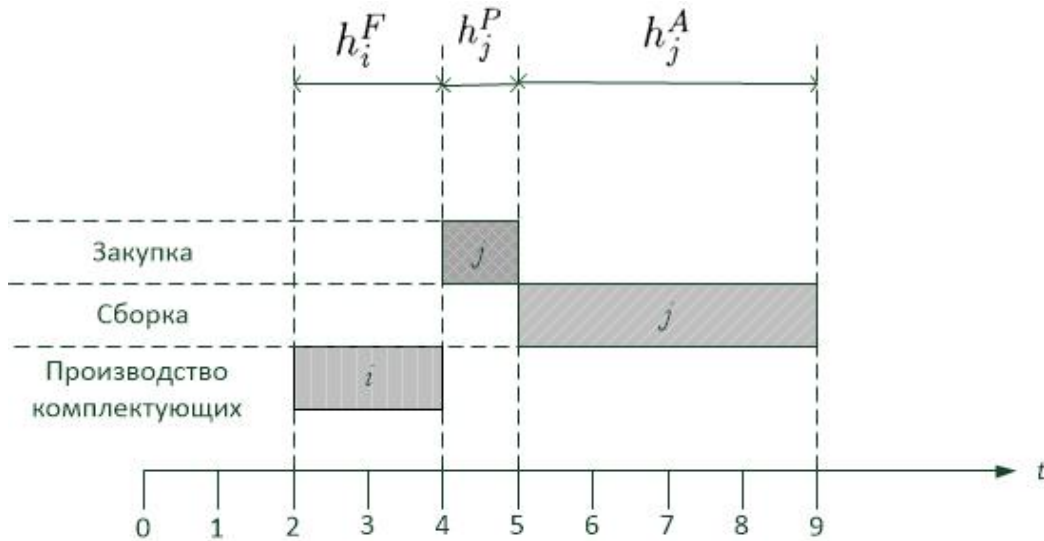


Рис. 2. Учет стоимости продукта по разным категориям
 Fig. 2. Accounting for the cost of a product in different categories

3. Имитационная модель

Методы моделирования, такие как моделирование дискретных событий, системная динамика и моделирование на основе агентов, обычно используются для исследования поведения сложных систем [12]. Такие методы моделирования используются для поддержки принятия производственных решений, включая проектирование технологических процессов, взаимодействие цепочек поставок и разработку стратегий планирования [13]. В то время как системная динамика и моделирование дискретных событий являются традиционными, агентное имитационное моделирование является относительно новым и может использоваться на всех уровнях абстракции. Агенты могут моделировать объекты разнообразной природы и масштаба, позволяют учитывать собственное поведение, что полезно при выполнении сложных исследований.

В современных средах имитационного моделирования модель разделена на компоненты – типовые объекты, которые помимо диаграммы процесса могут содержать дополнительную логику и правила взаимодействия с другими объектами [14]. Согласно разработанной архитектуре адаптивного планирования позаказного производства [15] из автоматизированной системы управления предприятием (АСУП) в имитационный модуль поступают данные о технологических операциях, необходимых для изготовления изделия. Заказы на все изделия представляют собой набор операций для выполнения производственного плана. Данный документ содержит информацию о длительности работ, оснастке, типе рабочей специализации, нормах времени по каждой операции (рис. 3).

	al_id	order_db	type	индекс	detal	job_code	lead_time	name_operation	pitch	amount	sequence
1	417,150	207,130	Б		Э4010-20-0045	540	0.033	Приготовление (смесей, флюсов)	2	1	270
2	417,151	207,130	Б		Э4010-20-0045	540	0.033	Приготовление (смесей, флюсов)	2	1	310
3	417,152	207,130	Б		Э4010-20-0045	686	0.033	Подготовительная для комплектования	2	1	320
4	417,153	207,130	Б		Э4010-20-0045	686	0.15	Сборочная для слесаря-сборщика	2	1	330
5	417,154	207,130	Б		Э4010-20-0045	206	0.015	Контроль ОТК	2	1	340
6	417,155	207,130	Б		Э4010-20-0064	686	0.022	Подготовительная для комплектования	1	1	10
7	417,156	207,130	Б		Э4010-20-0064	540	0.025	Приготовление (смесей, флюсов, композиций и рецептур)	1	1	20
8	417,157	207,130	Б		Э4010-20-0064	686	0.1	Пайка	1	1	30

Рис. 3. База данных модели
 Fig. 3. Model database

Рассмотрим процесс создания имитационной модели в мультиагентной среде AnyLogic. Для создания модели использовались типовые блоки библиотеки моделирования процессов AnyLogic: *source*, *queue*, *service*, *select output*, *sink*. Заявки на необходимые операции поступают из блока *Source*, в качестве агента выступает созданный тип агента *Operation*. Рабочие места представлены с помощью блока *Service*, который реализует очередь операций к рабочему месту,

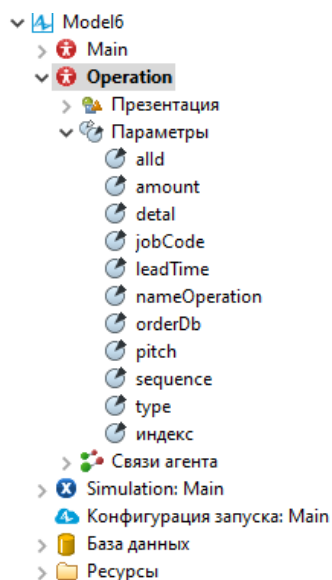


Рис. 4. Агент Operation
Fig. 4. Agent Operation

– количество рабочих мест варьируется и может составлять для каждой профессии от 1 до 20.

Для моделирования работы цеха необходимо выполнить сортировку операций по профессии рабочих. С использованием блока *Select output 5* распределяется поток операций по рабочим местам, исходя из профессии рабочего, который должен осуществлять такой тип операций. В качестве критерия сортировки прописывается условие соответствия свойства поступающего агента `agent.jobCode=` номеру профессии. Структуру модели можно увидеть на рис. 5.

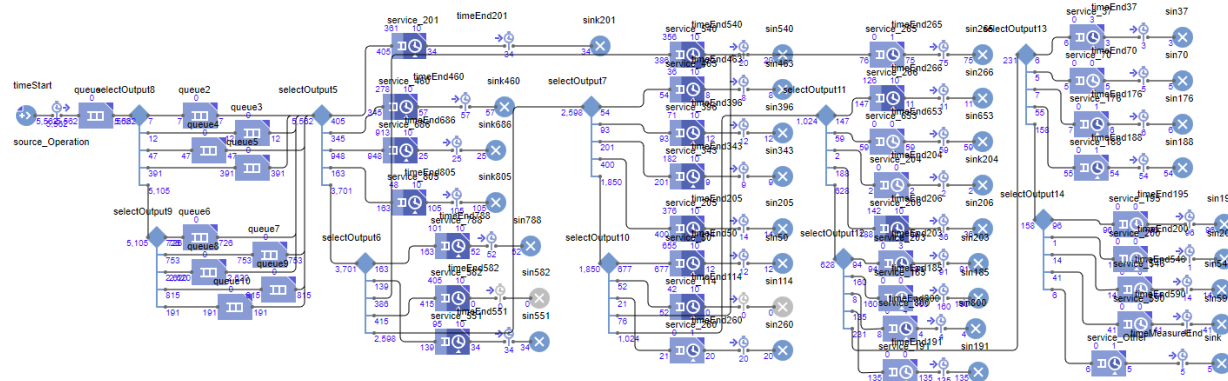


Рис. 5. Структура имитационной модели
Fig. 5. Structure of simulation model

Имитационная модель позволяет проверить реализуемость составленного производственного плана, а также рассчитать ожидаемые сроки выполнения заказа с учетом принятых допущений. Кроме этого вычисляются незагруженные или перегруженные рабочие места, что позволяет провести корректировку распределения людских ресурсов на предприятии. За счет существующей связи с АСУП возможно протестировать добавление новых заказов в общий портфель операций.

4. Оптимизационный эксперимент

Эффективность использования производственных мощностей в производстве на заказ является одним из главных критериев оптимизации. Для реализации производственного плана необходимо выявить возможные сдерживающие производство факторы. К таким факторам относятся:

- необоснованный простой производственных мощностей;

- некорректная загрузка производственных мощностей;
- некорректная укомплектованность цеха рабочими основного либо вспомогательного производства;
- некорректно установленные нормы времени на отдельно идущие позиции, выпускаемые данным подразделением,
- некорректно установленные тарифные сетки по отдельным либо ряду профессий;
- некорректно произведенный расчет численности набора персонала цеха.

Для того чтобы оценить загрузку производственных мощностей и минимизировать производственные затраты, необходимо провести анализ, позволяющий модели вычислить стоимость каждой произведенной операции в цехе. Каждая операция занимает определенные ресурсы, которые затем освобождаются. На время использования ресурса к стоимости операции добавляется стоимость использования этого ресурса, в остальное время добавляется стоимость простоя ресурса (рис. 6).

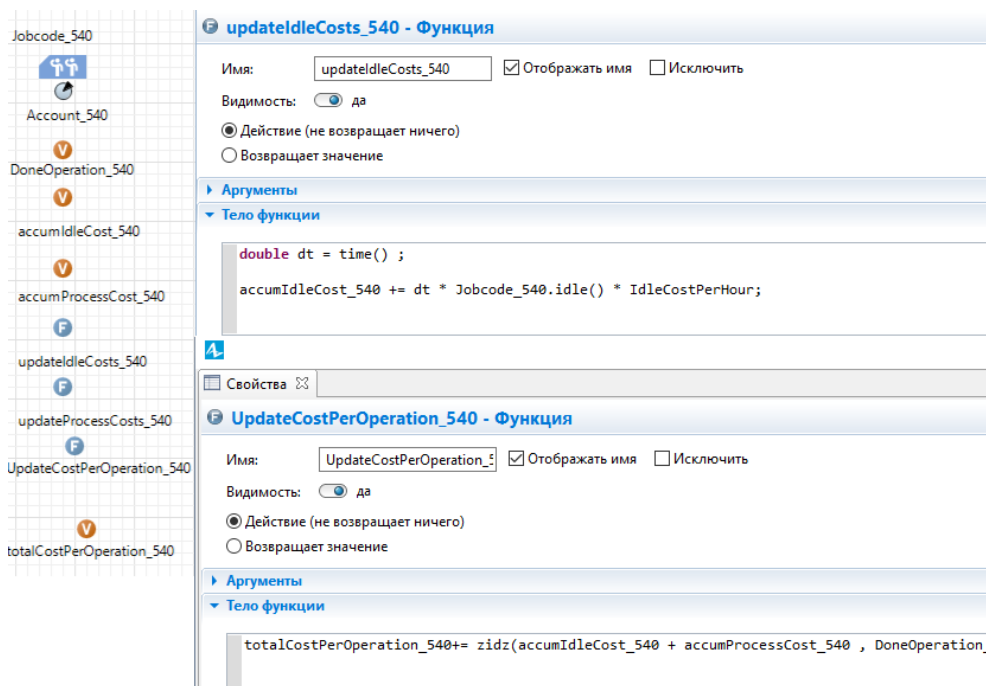


Рис. 6. Настройка параметров и функций по каждому пулу рабочих
Fig. 6. Setting parameters and functions for each worker pool

Среди профессий работников цеха исследованы характерные для производства радиоэлектронной аппаратуры: слесари-сборщики, монтажники, регулировщики, фрезеровщики, маркировщики. Цех является ключевым звеном в работе всех сборочно-монтажных цехов предприятия, поскольку участвует в большой работе по кооперации со смежными цехами, производя для них немалую долю комплектующих блоков, приборов, а также точечной и кабельной продукции.

Структура цеха делит рабочие места на восемь пулов рабочих:

- участок регулировки;
- антенный участок;
- участок кабельной продукции;
- участок намотки и пропитки;
- участок монтажа;
- участок сборки;
- выпускной участок;
- участок композитных материалов.

Для каждого типа рабочего места создается набор параметров:

- число рабочих мест по каждой профессии;
- стоимость загруженного рабочего места;
- стоимость простоя рабочего места.

Управление в технических системах

Для реализации модели и оптимизации необходимы переменные, отражающие общую загрузку и простой рабочих мест. Для каждой профессии возможно рассчитать стоимость простоя и загрузку рабочих мест. С учетом допущений стоимость простоя ($IdleCostPerHour$) и загрузки ($BusyCostPerHour$) для каждого рабочего места условно одинакова и равна 4 и 8 условных единиц соответственно.

Функция $UpdateIdleCost()$ рассчитывает стоимость простоя для каждого рабочего места и обновляет переменную $accumIdleCost$, а функция $UpdateProcessCosts()$ рассчитывает загрузки каждого рабочего места и обновляет переменную $accumProcessCost$. В переменную $DoneOperation$ записываются уже выполненные на рабочем месте операции. Для этого в блоке $Service$ для каждого типа операций задаются соответствующие действия при выходе из блока (рис. 7). Функции $UpdateProcessCosts()$ и $UpdateProcessCosts()$ используют для расчета модельное время. Для того чтобы понять стоимость работ по каждой операции, используется функция $UpdateCostPerOperation()$.

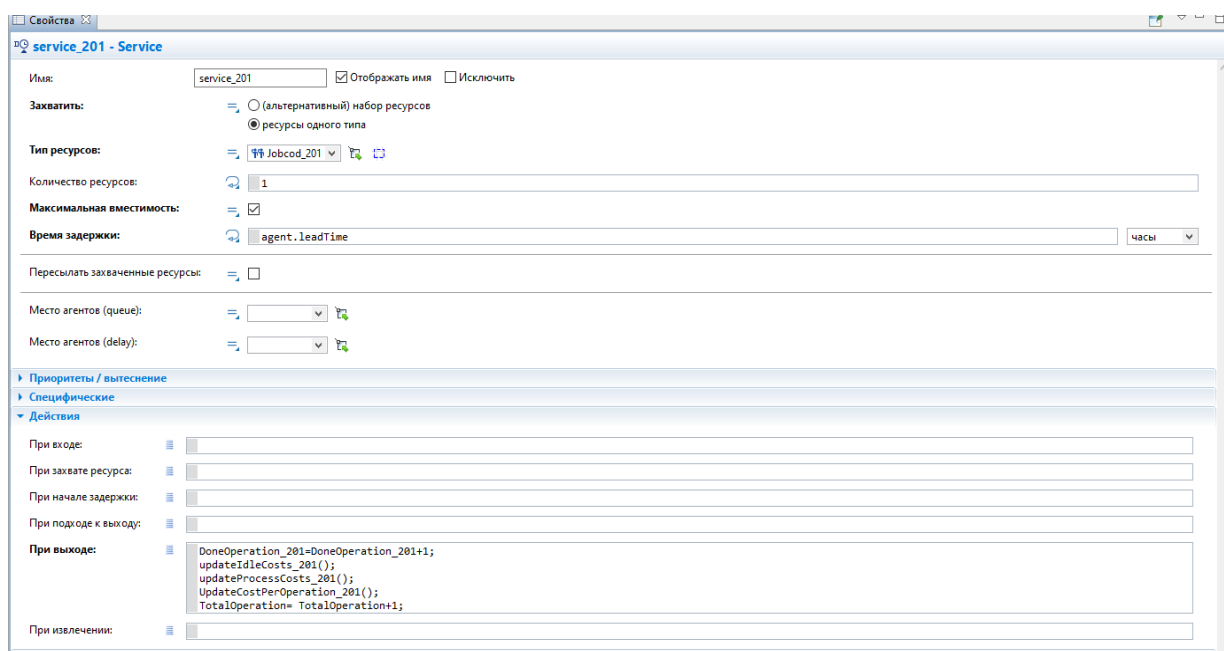


Рис. 7. Настройка действий при выходе для блока Service
Fig. 7. Configuring exit actions for the Service block

Для оптимизации модели создадим целевую функцию, позволяющую минимизировать производственные затраты и простой рабочих. Функция $totalCostPerOperation()$ (рис. 8) возвращает значение отношения суммы вариативных переменных стоимости по каждому производственному участку на количество выполненных операций. Данная функция является средним арифметическим значением затрат на каждую операцию по каждому рабочему месту.

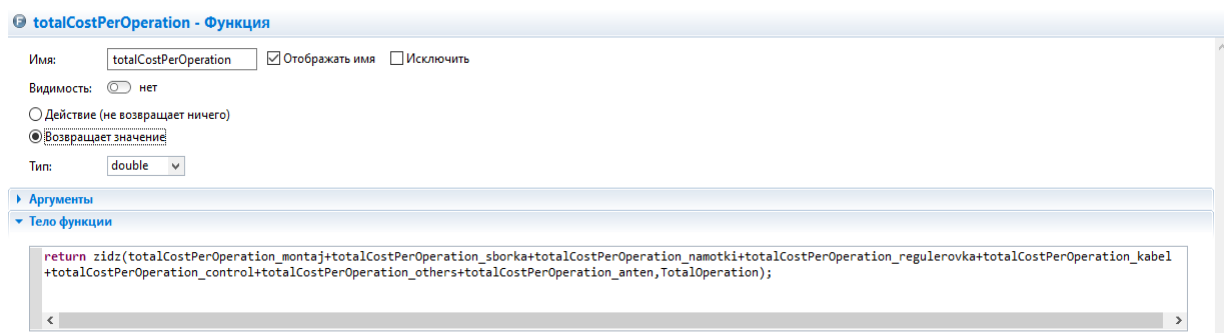


Рис. 8. Задание целевой функции
Fig. 8. Setting the objective function

Для определения значений параметров, позволяющих достигать максимальную эффективность, следует провести оптимизационный эксперимент с использованием разработанной имитационной модели. С помощью блока оптимизации найдем наилучшее количество рабочих мест при условии работы в одну смену. Ограничения целевой функции автоматически установлены в параметрах оптимизационного эксперимента на основании производственных характеристик, участвующих в имитационной модели производственного процесса. Реализация модели приводит к получению численных решений для диапазонов значений входных параметров.

Optimization_MinCost - Оптимизационный эксперимент

Имя: Исключить

Агент верхнего уровня:

Целевая функция: минимизировать максимизировать

Количество итераций:

Автоматическая остановка

Максимальный размер памяти: МБ

Параметры

Параметры:

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
Accoun...amotki	дискретный	1	25	1	
Account_sborka	дискретный	1	25	1	
Account_montaj	дискретный	1	25	1	
Accoun...erovka	дискретный	1	25	1	
Account_kabel	дискретный	1	25	1	
Account_control	дискретный	1	25	1	
Account_anten	дискретный	1	25	1	

Модельное время

Остановить:

Начальное время:

Начальная дата:

Конечное время:

Конечная дата:

Рис. 9. Окно настройки оптимизационного эксперимента
Fig. 9. Optimization experiment setup window

На рис. 9 представлен процесс настройки вариативности параметров, подлежащих анализу. Для того чтобы модель могла обрабатывать данные, все интересующие параметры оптимизации должны быть заданы в модели как переменные. Для вирулируемых параметров установим тип дискретный и зададим минимальное, максимальное значение, а также величину шага и начальное значение. В качестве целевой функции задаем минимизацию стоимости каждой операции. По итогам оптимизационного эксперимента (рис. 10) количество рабочих по каждому участку определено:

- участок регулировки – 3;
- антенный участок – 5;
- участок кабельной продукции – 5;
- участок намотки и пропитки – 7;
- участок монтажа – 4;
- участок сборки – 10;
- выпускной участок – 9.

	Текущее	Лучшее
Итерация:	273	247
Функционал ↓	37,948.382	36,708.752
Параметры		Copy best
Account_namotki	7	7
Account_sborka	10	10
Account_montaj	4	3
Account_regulirovka	3	3
Account_kabel	5	5
Account_control	10	9
Account_anten	6	5

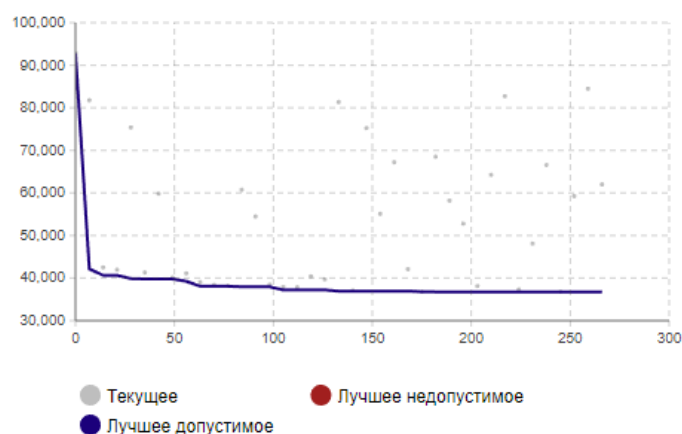


Рис. 10. Отчет по оптимизации
Fig. 10. Optimization report

Заключение

Сложные производственные процессы требуют применения специальных подходов для принятия управленческих решений. Исследование таких подходов эффективно с применением имитационных моделей. Предложенная в работе мультиагентная модель позволяет исследовать загрузку цеха, оценить производительность рабочих мест. Задача оптимального планирования в этом случае сводится к определению требуемого количества рабочих мест по каждой специальности рабочих при минимизации целевой функции совокупных затрат на производство. Минимизация затрат по каждому рабочему месту с одной стороны влечет за собой снижение количества рабочих мест, но при этом общее время выполнения заказа увеличивается. С другой стороны, скорость исполнения заказов и интенсивность выпуска продукции может быть увеличена за счет увеличения числа рабочих мест, что, очевидно, связано с дополнительными затратами на обустройство рабочих мест и оплату труда рабочих. Разработанная имитационная модель позволяет проверить реализуемость составленного производственного плана, а также рассчитать ожидаемые сроки выполнения заказа. Кроме этого, выявляются незагруженные или перегруженные рабочие места, что позволяет выполнить корректировку распределения ресурсов. Для поиска оптимальной загрузки производственных мощностей проведен оптимизационный эксперимент. Эксперимент позволяет получать численные решения для каждого варианта исходных данных. Использование данного критерия в реальном производственном процессе также позволит сократить необоснованный простой рабочих мест, их некорректную загрузку, скорректирует расчет численности набора персонала цеха.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00226.

Литература/References

1. Salamati-Hormozi H., Zang Z.H., Zarei O., Ramezani R. Trade-off between the costs and the fairness for a collaborative production planning problem in make-to-order manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 126, pp. 421–434. DOI: 10.1016/j.cie.2018.09.044
2. Denkena B., Dittrich M.A., Jacob S. Methodology for integrative production planning in highly dynamic environments. *Production Engineering*, 2019, vol. 13, pp. 317–324. DOI: 10.1007/s11740-019-00889-0
3. Han J.H., Lee J.Y., Kim Y.D. Production planning in a two-level supply chain for production-time-dependent products with dynamic demands. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 126, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.cie.2019.05.036

4. Bruni M.E., Puglia Pugliese L. Di, Beraldi P., Guerriero F. A computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 2018, vol. 99, pp. 178–190. DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.016
5. Garmdare H.S., Lotfi M.M., Honarvar M. Integrated model for pricing, delivery time setting, and scheduling in make-to-order environments. *Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol. 14, pp. 55–64. DOI: 10.1007/s40092-017-0205-y
6. Alvarez-Gill N., Rosillo R., De la Fuente D., Pino R. A discrete firefly algorithm for solving the flexible job-shop scheduling problem in a make-to-order manufacturing. *Central European Journal of Operations Research*, 2020. DOI: 10.1007/s10100-020-00701-w
7. Goodall P., Sharpe R., West A. A date-driven simulation to support remanufacturing operations. *Computers in Industry*, 2019, vol. 105, pp. 48–60. DOI: 10.1016/j.compind.2018.11.001
8. Lofving M., Almstrom P., Jarebrant C., Wadman B., Widfeldt M. Evaluation of flexible automation for small batch production. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 25, pp. 177–184. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.072
9. Beemsterboer B., Teunter R., Land M., Bokhorst J. Integrating make-to-order and make-to-stock in job shop control. *International Journal of Production Economics*, 2017, vol. 185, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.12.015
10. Kapulin D.V., Russkikh P.A. Analysis and improvement of production planning within small-batch make-to-order production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515, no. 2. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022072
11. Hermmati S., Ebadian M., Nahvi A. A new decision making structure for managing arriving orders in MTO environments. *Expert Systems with Application*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 2669–2676. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.08.122
12. Jeon S.M., Gitae K. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). *Production Planning & Control*, 2016, vol. 27, iss. 5, pp. 360–377. DOI: 10.1080/09537287.2015.1128010
13. Barlas P., Heavey C. Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: A review. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2016, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1142/S1793962316300016
14. Mokshin V.V., Kirpichnikov A.P., Soiko A.I. Simulation and optimization of the cargo terminal in the AnyLogic environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1368. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/4/042082
15. Русских П.А., Капулин Д.В. Анализ решений для создания и реализации механизмов адаптивного планирования позаказного производства. Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 1 (56). С. 44–48. [Russkikh P.A., Kapulin D.V. [Analysis of solutions for the creation and implementation of adaptive planning mechanisms for make-to-order production]. *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2021, vol. 1, no. 56, pp. 44–48. (in Russ.)].

Русских Полина Андреевна, аспирант, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; Prusskikh@sfu-kras.ru.

Капулин Денис Владимирович, канд. техн. наук, заведующий базовой кафедрой информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; DKapulin@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 5 июля 2021 г.

MULTI-AGENT MODEL OF MULTI-NOMENCLATURE SMALL BATCH PRODUCTION

P.A. Russkikh, Prusskikh@sfu-kras.ru,

D.V. Kapulin, DKapulin@sfu-kras.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Production planning is a key aspect when optimizing production activities. Simulation is one of the most effective methods available for assessing production problems. The principles of adaptive planning consist of making day-to-day operational decisions at the shop floor, predicting equipment availability, assessing performance, and eliminating bottlenecks. Existing research to eliminate bottlenecks has focused on analyzing data from the physical shop, or vice versa, only on the use of simulated data. Convergence between real and simulated data allows, on the one hand, to obtain more information to predict the availability of each workplace, on the other hand, it allows performance assessment for replanning using a simulation model. **Aim.** Development of optimization tools for production planning using simulation approaches. **Materials and methods.** This article presents a multi-agent simulation model for each workplace in the workshop, examines the workload of the workshop, and evaluates the productivity of workplaces. Optimization is proposed for optimal utilization of production facilities. As an example illustrating the efficiency and advantage of the proposed model, we took the production process of electronic equipment in the assembly shop. **Results.** A planning problem and an approach to optimization are formulated. A multi-agent model of multinomenclature small-scale production has been developed. The model provides for the integration of simulation tools with operational planning systems at the data level. **Conclusion.** The model proposed in the study allows small-scale production to plan the number of jobs and identify bottlenecks in production. The use of a combination of simulation and planning tools ensures enterprise resource management, taking into account dynamic changes in the system.

Keywords: small-scale production, make-to-order production, planning tools, methods of simulation optimization.

Received 5 July 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Русских, П.А. Мультиагентная модель многономенклатурного мелкосерийного производства / П.А. Русских, Д.В. Капулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 69–80. DOI: 10.14529/ctcr210406

FOR CITATION

Russkikh P.A., Kapulin D.V. Multi-Agent Model of Multi-Nomenclature Small Batch Production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 69–80. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210406