

На правах рукописи



Русских Полина Андреевна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ
МОНТАЖНО-СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

**2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Красноярск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт космических и информационных технологий, г. Красноярск.

Научный руководитель:

Капулин Денис Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
директор Института космических и
информационных технологий

Официальные оппоненты

Истомин Андрей Леонидович

доктор технических наук, доцент, декан
факультета управления и бизнеса ФГБОУ
ВО «Ангарский государственный
технический университет».

Доррер Михаил Георгиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Информационно-управляющих систем»
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева».

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии
наук», Институт вычислительного моделирования Министерства науки и
высшего образования Российской Федерации, г. Красноярск;

Защита состоится 28 марта 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного
совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф.
Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский
рабочий» 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. Л-205

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
отправлять по адресу: 660037, Россия, г. Красноярск, просп. им. газеты
«Красноярский рабочий», 31, Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф.
Решетнева), Диссертационный совет E-mail: dissovet@sibsau.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современное производство радиоэлектронной аппаратуры является дискретным, отличается позаказностью и многономенклатурностью. Многочисленные компоненты, большое число деталей и вложенность продуктов, сложные параметры управления производством, использование ручных методов планирования приводят к росту числа незавершенных заказов и снижают эффективность такого типа производств. Кроме этого, отличительной особенностью такого производства является наличие монтажно-сборочных процессов (МСП), которые являются решающими в вопросе своевременности выпуска продукции, но их трудно автоматизировать для многономенклатурного производства. Эффективность МСП определяется качеством принятия оперативных решений на уровне цеха, прогнозирования доступности оборудования, оценки производительности и устранения узких мест, т. е. уровнем автоматизации процесса оперативного планирования в режиме реального времени.

Одной из ключевых задач при разработке методов оперативного планирования является синхронизация отдельных стадий и работ производственного процесса. В частности, каждая операция МСП характеризуются определенным ритмом и темпом работ, и общий объем выпуска продукции определяет производственный темп. Необходимость синхронизации учитывается для поточных производственных линий, но не менее существенное влияние оказывает синхронность процессов для позаказного дискретного производства. Реализация принципа синхронизации предполагает необходимость сопоставления ресурсов на каждом этапе производственного цикла и их постоянное регулирование. Существующие методы оперативного планирования и реализующий их автоматизированные системы часто не синхронизированы с текущим производственным процессом, что приводит к высокому уровню незавершенных заказов. Необходим новый взгляд на существующие автоматизированные системы оперативного планирования в рамках их применения для МСП и поиск подхода к автоматизации создания оперативно-производственного плана с учетом фактической реализации обеспечиваемого производственного процесса.

Степень разработанности темы. Изучением методов построения цифровых информационно-управляющих систем производством занимаются А.И. Боровков, В.И. Абрамов, Е.П. Алемасов. В свою очередь вопросами имитационного моделирования функционирования промышленных систем занимались А.А. Ключко, В.А. Смелов, Е.А. Назойкин. Вопросами автоматизации процессов оперативного планирования для позаказных производств занимались отечественные исследователи, среди которых Р.Р. Загидуллин, Е.Б. Фролов, М.А. Казанцев, А.А. Баранов, так и зарубежные исследователи Т. Савик, Л.С. Гендри, С.К. Грэйвс.

Анализ работ этих ученых показал, что применение средств имитационного моделирования для прогнозирования производственных процессов и работа с фактическими производственными данными при оперативном планировании уже известны, но при этом нет комплексного подхода и соответствующей методики, позволяющих синхронизировать процессы планирования и управления в МСП. Следует разработать подход, позволяющий синхронизировать построение оперативных планов по фактическим событиям для МСП, обеспечивающий прогноз дальнейшего выполнения производственного заказа. Данная задача является более сложной, в отличие от традиционного статического построения планов: условия планирования могут меняться с течением времени, меняется приоритет выполнения заказов или добавляется новый заказ, становятся недоступны производственные ресурсы, возникают задержки в выполнении существующего плана, что требует его перестройки.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности монтажно-сборочных процессов радиоэлектронной аппаратуры за счет автоматизации оперативного планирования и управления.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Провести анализ основных существующих методов планирования и автоматизированного управления МСП позаказного производства радиоэлектронной аппаратуры. Выполнить математическую постановку задачи построения расписания и оптимизации оперативного плана МСП.
2. Разработать метод автоматизированного мониторинга МСП с использованием комбинации фактических и модельных производственных данных.
3. Разработать имитационную модель динамического распределения ресурсов МСП при решении задачи оперативного планирования.
4. Разработать метод автоматизации оперативного планирования МСП с учетом необходимости синхронизации производственных процессов и реализовать его в виде программного обеспечения. Провести интеграцию разработанного ПО с существующей АСУП.
5. Оценить эффективность применения разработанных методов и модели при автоматизации монтажно-сборочных процессов.

Научная новизна исследования:

1. Впервые разработан метод синхронного оперативного планирования монтажно-сборочных процессов, отличающийся от известных методов планирования наличием процедуры выравнивания производственного такта с динамическим обновлением оперативного плана, что позволяет синхронизировать монтажно-сборочные процессы, тем самым обеспечить прогнозируемый срок исполнения заказов и повысить эффективность производства.

2. Разработана новая имитационная модель монтажно-сборочных процессов, обеспечивающая эффективность управления монтажно-сборочными процессами за счет динамического анализа реализуемости показателей текущего оперативного плана.

3. Предложен метод мониторинга МСП, отличающийся от известных комбинированным использованием фактических и модельных производственных данных для сокращения длительности производственного цикла и уменьшения числа незавершенных заказов.

Область исследований соответствует пунктам 11 и 13 паспорта научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синхронного оперативного планирования монтажно-сборочных процессов позволяет синхронизировать процесс оперативного планирования и управления монтажно-сборочными процессами в режиме реального времени.

2. Имитационная модель монтажно-сборочных процессов для динамического анализа и оптимальной загрузки производственных мощностей позволяет проводить проверку реализуемости составленного производственного плана, а также рассчитать ожидаемые сроки выполнения заказа.

3. Метод мониторинга монтажно-сборочных процессов позволяет отслеживать прогресс выполнения заказа, прогнозировать последствия добавления того или иного заказа в систему, возможность выполнения заказа в срок.

4. Автоматизированная система планирования монтажно-сборочных процессов в виде комплекса программного обеспечения, разработанного на основе предлагаемых методов позволяет сократить длительность монтажно-сборочного цикла, повысить производительность рабочих мест и сократить количество незавершенного производства.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов синхронизации процессов планирования позаказных многономенклатурных производств за счет разработки алгоритмов согласования производственных ритмов. Разработанный метод мониторинга, реализуемый через автоматизированный сбор данных и параметров производственного процесса, позволяет рассчитывать статистические характеристики и параметры загрузки рабочих мест с возможностью прогнозирования состояния заказа при помощи имитационного моделирования.

Практическая значимость исследования состоит в разработке программного обеспечения автоматизированной системы синхронного оперативного планирования и интеграции разработанного ПО с существующей автоматизированной системой управления предприятием АО «НПП «Радиосвязь». Предложенный метод синхронного оперативного планирования монтажно-сборочных процессов используется в деятельности монтажно-сборочного цеха и дает возможность повысить эффективность

использования ресурсов предприятия, а разработанная имитационная модель монтажно-сборочных процессов позволяет многономенклатурным мелкосерийным производствам проводить проверку исполнимости оперативного плана и выявлять узкие места. Предложенные методы, которые были применены на АО «НПП «Радиосвязь», что подтверждается актом внедрения, могут быть использованы для других монтажно-сборочных производств полного цикла мелкосерийного типа, а также в учебном процессе по дисциплинам «Производственная логистика» и «Имитационное моделирование» при подготовке магистров по программам «Киберфизические системы управления производством».

Диссертационная работа была подготовлена в рамках научного проекта РФФИ № 20-07-00226 «Исследование вариантов построения архитектуры информационной системы синхронного планирования позаказного сборочного производства».

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях: MIP Engineering-IV 2022: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации, Санкт-Петербург; APITECH-III 2021, Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг, Красноярск; ITBI 2020, Информационные технологии в бизнесе и промышленности, Новосибирск; ICMSIT 2020, Метрологическое обеспечение инновационных технологий, Санкт-Петербург; MIST: Aerospace 2019, Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации, Красноярск; HIRM 2019, Современные технологии и инновации в науке и промышленности, Красноярск; ITBI 2018, Информационные технологии в бизнесе и промышленности, Новосибирск.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 16 научных работ, включая 5 работ в рецензируемых научных изданиях ВАК, 6 публикаций, входящих в систему цитирования Web of Science, Scopus, получены 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1, 5,7, 8] – анализ методов повышения эффективности МСП приборостроительного предприятия; [2, 11, 12] – имитационная модель монтажно-сборочных процессов; [3,4,9] – метод мониторинга МСП; [4, 5, 10,13] – метод синхронного оперативного планирования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав заключения, списка использованной литературы из 118 наименований и 4 приложений. Текст диссертации изложен на 122 страницах, содержит 53 рисунка и 26 таблиц, общий объем с учетом приложений составляет 175 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указана актуальность диссертационной работы, формулируется цель, решаемые задачи, представлены основные положения,

выносимые на защиту, описана научная новизна и практическая значимость исследований, приведено краткое содержание по главам.

В первой главе проведен анализ особенностей монтажно-сборочного производства позаказного типа, основных методов планирования и управления и поставлена задача оперативного планирования. Общая эффективность такого типа производств определяется качеством принятия оперативных решений на уровне цеха, прогнозирования доступности оборудования, оценки производительности и устранения узких мест, т. е. автоматизацией процесса оперативного планирования в режиме реального времени.

Представим полный цикл сборочного производства при изготовлении на заказ. Введем в таблице 1 обозначения для формализации задачи оперативного планирования по каждому уровню производственной цепочки:

Таблица 1 – Обозначения параметров задачи оперативного производственного планирования

Переменная	Значение
Заказчик	
$a = 1, \dots, A$	Заказы клиентов
d_a	Срок выполнения заказа
d^{max}	Максимальный срок выполнения заказов
Сборка	
$j = 1, \dots, J$	Все сборочные работы
$j = s_a, \dots, e_a$	Сборочные работы по заказу a
$0(J + 1)$	Фиктивный источник интегрированного графа сборки
J	Количество нефиктивных сборочных работ
J	Набор всех сборочных работ (включая 0 и $J + 1$) интегрированной сборочной сети
$ES_j(LS_j)$	Самое раннее (позднее) время начала сборочных работ j
p_j	Время обработки для сборочного задания j
P_j	Набор непосредственно предшествующих заданий для сборочного задания j
$\tilde{P}_j$	Набор всех предшествующих заданий для сборочного задания j
I_j	Набор непосредственных связанных заданий для сборочного задания j
$t_{h,j}^{min}$	Временная задержка между временем окончания задания h и началом выполнения задания j
h_j^A	Стоимость хранения всех деталей, собранных по заданию j
$q_{j,i}$	Количество деталей типа i , собранных по заданию j
$r = 1, \dots, R^A$	Множество типов оборудования участвующего в сборке
$C_{r,t}^A$	Доступность сборочного оборудования r в момент t
$c_{j,r}$	Доступность оборудования r запрошенного сборочным заданием j в процессе обработки
$x_{j,t}$	Бинарная переменная, равная 1, если сборочное задание j начинается в момент времени t , и 0 в противном случае
Производство деталей	
$i = 1, \dots, I$	Типы деталей
h_i^F	Стоимость хранения деталей типа i

Переменная	Значение
s_i	Затраты на переналадку для деталей типа i
$r = 1, \dots, R^F$	Множество типов производственного оборудования, участвующего в процессе изготовления
$C_{r,t}^F$	Доступность производственного оборудования типа r в период t
r_i^F	Производственное оборудование, на котором обрабатывается деталь типа i
$Q_{i,t}$	Объем производства детали типа i в период t
$I_{i,t}$	Запасы детали типа i на конец периода t
$y_{i,t}$	Бинарная переменная, равная 1, если деталь типа i произведена в период времени t , и 0 в противном случае
Закупка	
h_j^P	Стоимость хранения закупленных деталей
T	Горизонт планирования

Чтобы представить задачу оперативного планирования введем следующие переменные. Для сборки введена 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 $I_{i,t} \geq 0$, равную запасам детали 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. Минимизируем функцию:

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

при условиях:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Минимизация функции стоимости (1) представляет общую себестоимость продукции, которая складывается из затрат на производство комплектующих, закупки и сборки. Ограничение (2) гарантирует, что каждый заказ будет завершен не позже установленного срока.

Интегрированный граф сборки заказа представлен как ограничение (4) и (5), моделирующие ограничения сборочных мощностей. Уравнение (6) связывает поток деталей между изготовлением и сборкой. Ограничения (7), (8), (9) и (10) моделируют этапы производства.

Задачу оперативного планирования для мелкосерийного многономенклатурного производства можно сформулировать как непрерывный процесс принятия решений, влияющий на аспекты производства в ответ на немедленные или ожидаемые проблемы. Возможность оперативного решения проблем необходима из-за временных ограничений и отсутствия возможности корректировки из-за невыполнимого графика. Обзор существующих решений в данной области показал, что существующие программные решения оперативного планирования трудно напрямую применить для производств, имеющих монтажно-сборочный принцип работы и обладающих широким ассортиментом производимой продукции. В существующих системах планирования отсутствует возможность синхронизации производственных процессов и производственных планов.

Вторая глава посвящена разработке методов мониторинга МСП и синхронного оперативного планирования. Сложность автоматизации процесса оперативного планирования для дискретных позаказных производств связана с разнородной средой заказов. Каждый заказ включает в себя различные сборочные работы, которые не могут быть унифицированы для разных изделий, производство которых требует как деталей собственного производства, так и заблаговременной закупки составных частей. Главная сложность состоит в координации изготовления и сборки в условиях ограниченных мощностей предприятия, так чтобы минимизировать затраты или потери во всей производственной цепочке.

Синхронизация монтажно-сборочных процессов обеспечивается осуществлением одинаковых скоростей подачи и использования деталей, а также установления постоянной пропорциональности между начальными этапами последовательных операций. Выравнивание временных интервалов выполнения отдельных операций и создание организационно-технических предпосылок для обеспечения равенства или пропорциональности скоростей подачи и использования компонентов являются ключевыми задачами синхронизации. В этом контексте, синхронизация монтажно-сборочных процессов определяется как координированное осуществление двух или более операций, характеризующееся синхронностью или постоянным временным сдвигом моментов их старта и завершения, а также сбалансированным объемом производства и потребления компонентов. Целью синхронизации является достижение согласованности ритмов всех сборочных этапов с ритмом заключительного этапа. Организация синхронизированного сборочного производства предполагает равномерную активность всех звеньев монтажно-сборочной цепи и требует высокой степени синхронности операций.

Время такта (T), это метрика, используемая для синхронизации работы монтажно-сборочных процессов. Оно рассчитывается как отношение доступного времени производства (tt) к количеству требуемых единиц продукции (D), которые необходимо произвести в определенный период времени:

$$T = tt/D. \quad (11)$$

Для синхронизации монтажно-сборочных процессов необходимо определить средневзвешенное время операции:

$$R_n = \sum_{l \in L_n} (ot_l \cdot P_l), \quad (12)$$

где l — индекс сборочной операции, L_n индекс набора сборочных операций для рабочего места n , ot_l время сборки для операции l , P_l вероятность возникновения сборочной операции l .

На рисунке 1 представлена модель синхронизации:

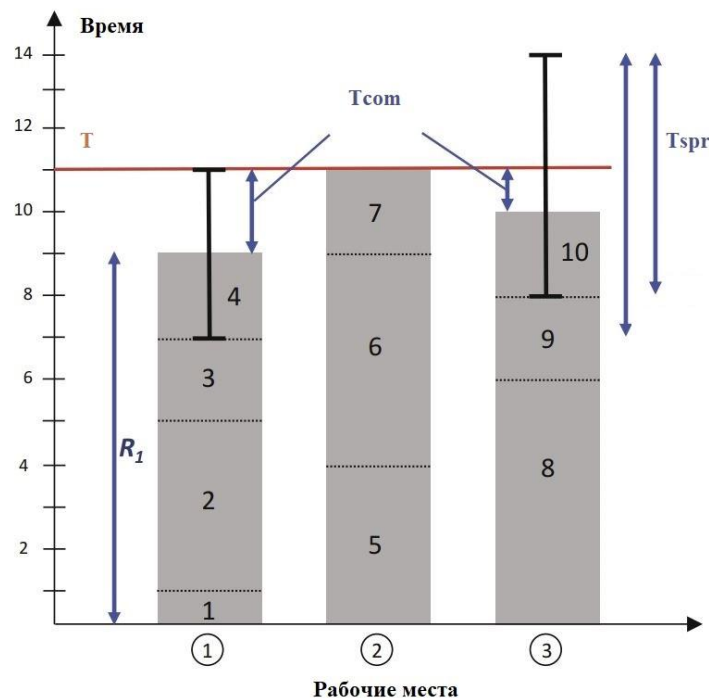


Рисунок 1 – Модель синхронизации рабочих мест

Показатель $Tspr$ - время разброса такта, относится к разбросу или диапазону тактового времени в производственной системе, где производятся различные продукты, указывает на разницу между самым коротким и самым длинным тактовым временем для разных продуктов или заказов. $Tcom$ - время компенсации, равно разнице между временем такта и средневзвешенным временем операции. Эффективность синхронизации производственной линии — это мера того, насколько равномерно распределены рабочие операции между рабочими местами на производственной линии. Цель синхронизации — минимизировать простои и уменьшить время цикла, увеличивая при этом производительность и снижая затраты. Эффективность синхронизации производственной линии равна:

$$E_{al} = \frac{c_b}{c_v} \cdot 100\% = \frac{\sum_{n=1}^N R_n}{NT} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где C_b фактическая требуемая мощность, C_v существующий объем производственных мощностей, n – число сборочных рабочих мест, R_n – средневзвешенное время выполнения операции на рабочем месте n , T – время такта. Обратная величина эффективности синхронизации дает коэффициент компенсации такта. Таким образом, коэффициент компенсации такта равен:

$$TA = \frac{N \cdot T - \sum_{n=1}^N R_n}{N \cdot T} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Структура разработанной автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов представлена на рис. 2. Комплекс программ планирования монтажно-сборочных процессов состоит из имитационного модуля, модуля синхронизации, модуля ДКПСЦ и модуля составления расписаний производственного планирования, они реализованы в виде программных компонентов, разработанных в кросс-платформенной интегрированной среде разработки прикладного программного обеспечения Qt Creator.

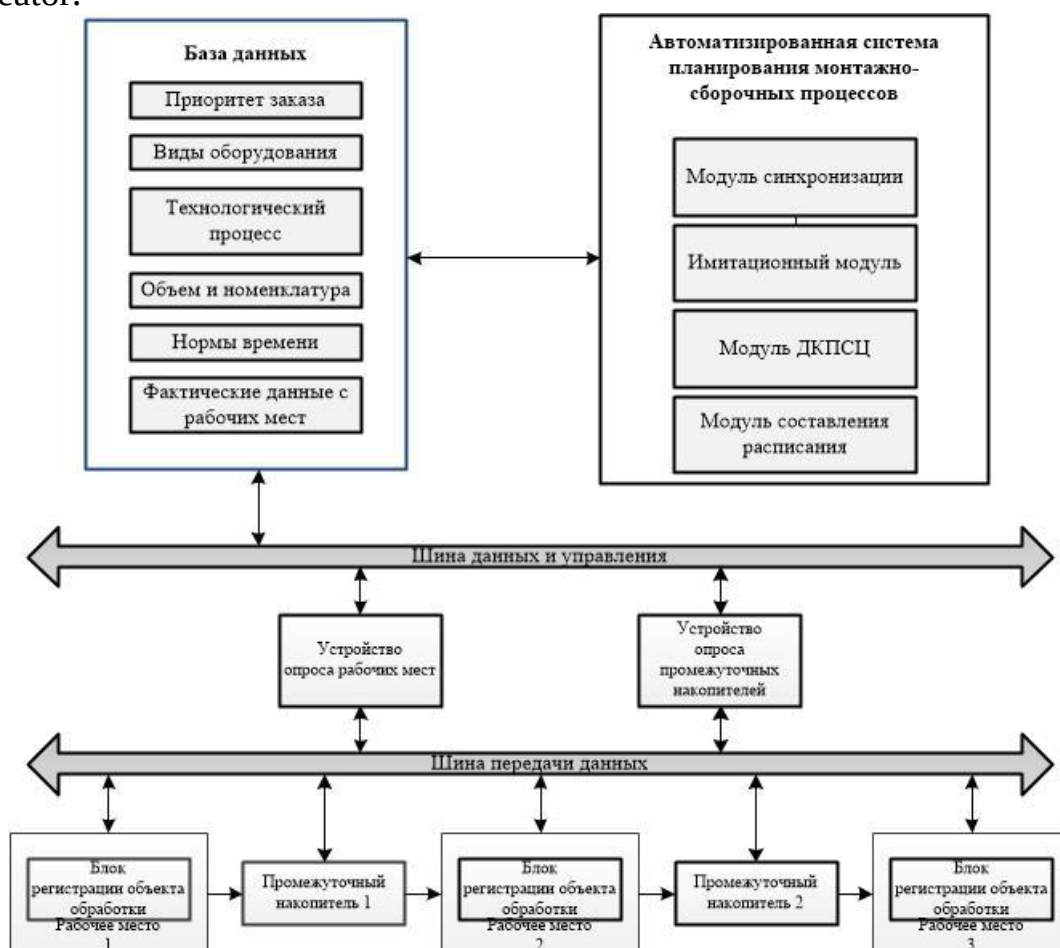


Рисунок 2 – Структура автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов

Данные программные компоненты загружаются в исполняемую среду автоматизированного рабочего места предлагаемой системы планирования монтажно-сборочных процессов. Согласно разработанной структуре системы из базы данных в имитационный модуль поступают данные о технологических операциях, необходимых для изготовления изделия.

Мониторинг монтажно-сборочных процессов происходит путем динамического создания карты потока создания ценности. Анализ карты потока создания ценности используется для повышения эффективности производства за счет выявления узких мест, анализа потерь материальных и информационных потоков. На рис. 3 дан алгоритм метода мониторинга МСП. На рис. 4 дан алгоритм автоматизированного обновления.



Рисунок 3 – Алгоритм мониторинга МСП

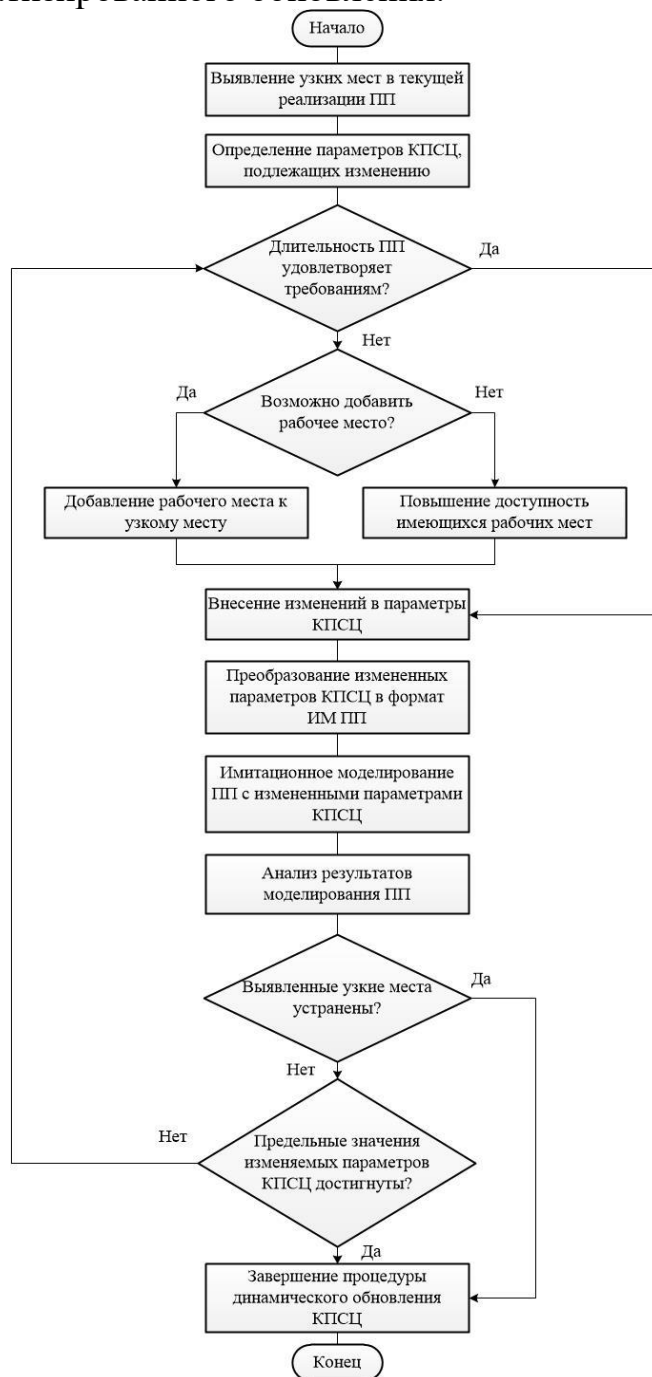


Рисунок – 4. Алгоритм автоматизированного обновления

Через автоматизированный сбор данных и параметров производственного процесса происходит расчет статических характеристик и параметров загрузки рабочих мест. Заказы на все изделия представляют

собой набор операций, необходимых к выполнению для реализации производственного плана. Интеграция на уровне данных и согласованная работа компонентов архитектуры системы планирования монтажно-сборочных процессов позволяют использовать имитационное моделирование для скорейшего решения задачи создания производственного расписания, реализовать принцип динамичности и синхронности планирования. Модуль имитационного моделирования позволяет заранее изучить последствия добавления того или иного заказа в систему и возможность выполнения заказа в срок. Комбинирование фактических производственных данных и данных, полученных при помощи имитационного моделирования, позволяет как производить текущий мониторинг выполнения производственных заказов, так и эффективно оценивать будущее состояние системы.

Третья глава описывает процесс разработки имитационной модели динамического распределения ресурсов МСП при решении задачи оперативного планирования. Для полноценной работы автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов в состав ее компонентов должен входить имитационный модуль. Эффективность работы этого модуля напрямую зависит от качества входящей в его состав имитационной модели производственного процесса.

МСП представляется как система массового обслуживания (СМО) (рис. 5) Для производства существует набор заказов, которые должны быть произведены. Учитывая тот факт, что планово-учетной единицей планирования мелкосерийного многономенклатурного производства является заказ, для моделирования работы монтажно-сборочных процессов в качестве заявок на обслуживание используется набор операций, необходимых к выполнению. Эти операции получают из разузлования заказа, соответственно, интенсивность поступления операций, необходимых к выполнению рабочими местами, не является существенным показателем. Все операции, необходимые для выполнения заказа, появляются в очереди на обслуживание, как только заказ поставлен на выполнение.

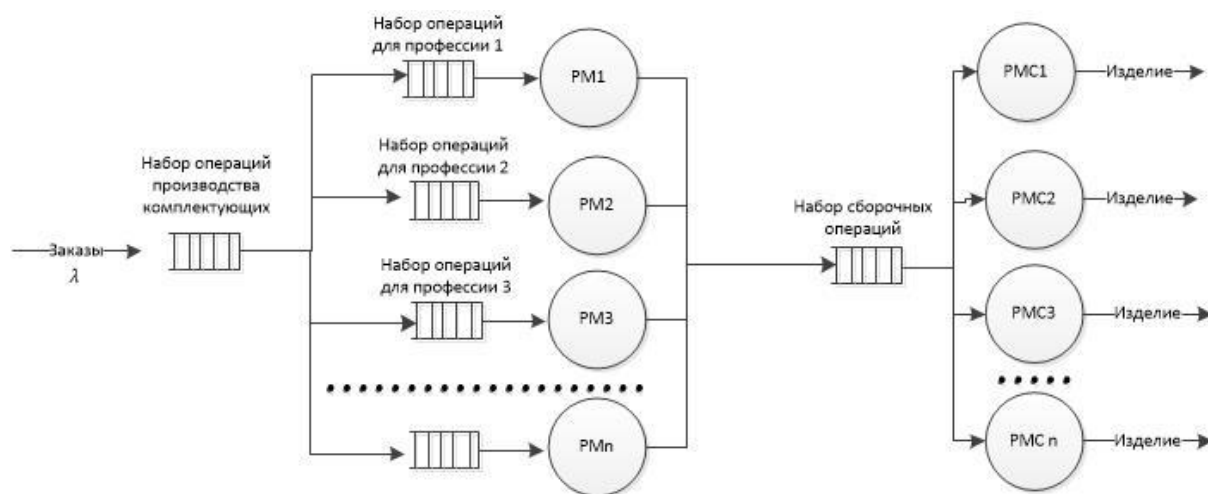


Рисунок 5 – Модель монтажно-сборочных процессов в виде системы массового обслуживания

Модель реализована в системе AnyLogic в виде агентной модели СМО. На фрагменте имитационной модели (рис. 6) представлен источник заказов, рабочие места по необходимому типу операции, очереди, в которых заказы будут ожидать, если пропускная способность последующих шагов окажется недостаточной и узел-приемник в качестве завершения процесса. В качестве параметров, характеризующих каждую поступающую операцию, берем данные, выгруженные с базы данных АСУП. Каждая операция, генерируемая в источнике – это агент, который позволяет создать неограниченное число разных операций, каждая из которых имеет свои индивидуальные параметры. Каждая операция различается временем выполнения и необходимой оснасткой, все это прописано в свойствах генерируемых агентов. Кроме этого, каждая операции имеет свой уровень вложенности в итоговое изделие и, поэтому, имеет приоритет при изготовлении. Чем ниже уровень вложенности, тем раньше должна быть выполнена операция. Чтобы определить правила перехода операции из очереди на обработку на рабочем месте необходимо учесть уровень вложенности операции в изделие. Для модели приняты допущения, что каждое рабочее место обрабатывает не более одной операции за раз, технологические операции одного уровня вложенности для разных изделий могут выполняться параллельно.

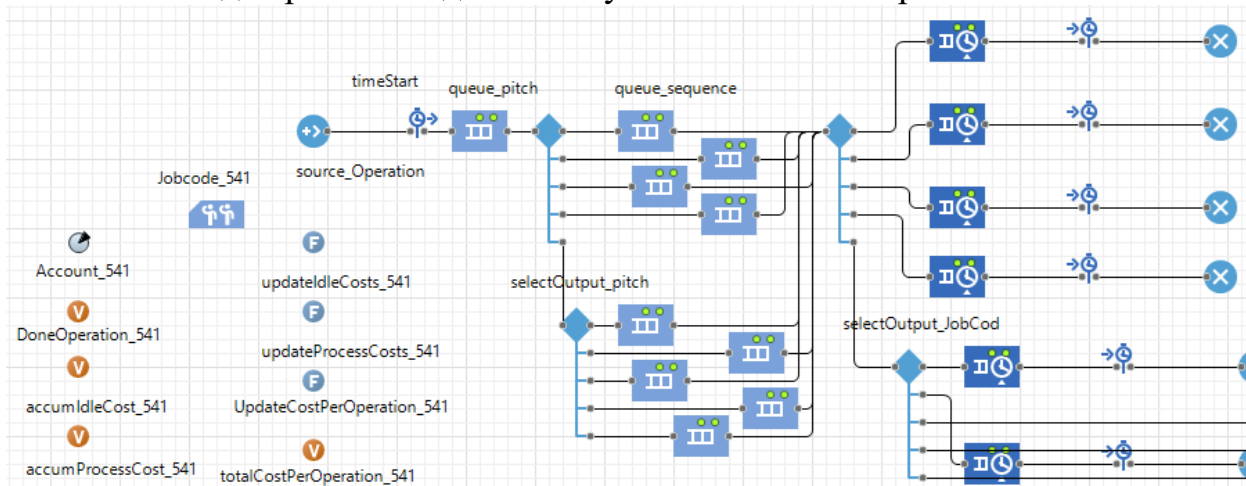


Рисунок 6 – Фрагмент имитационной модели монтажно-сборочного процесса

Учитывая особенности монтажно-сборочного процесса и необходимость выполнения операций в определенном порядке, в блоках очереди происходит проверка и операции выстраиваются в последовательность согласно технологической цепочке. Количество рабочих мест варьируется в модели и может составлять для каждой профессии от 1 до 20. Для моделирования работы монтажно-сборочного производства необходимо провести сортировку операций. При этом агенты распределяются 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.

Созданная имитационная модель динамического распределения ресурсов МСП позволяет проверить реализуемость составленного производственного плана, а также рассчитать ожидаемые сроки выполнения заказа в идеальных условиях. Кроме этого, выявляются незагруженные или перегруженные рабочие места, что позволяет провести корректировку распределения людских ресурсов. За счет существующей связи с системой АСУП возможно протестировать добавление новых заказов в общий портфель заказов.

Четвертая глава описывает процесс разработки автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов в виде комплекса программного обеспечения, разработанного на основе предлагаемых методов. В главе предложен комплекс алгоритмов и архитектура для метода синхронного оперативного планирования.

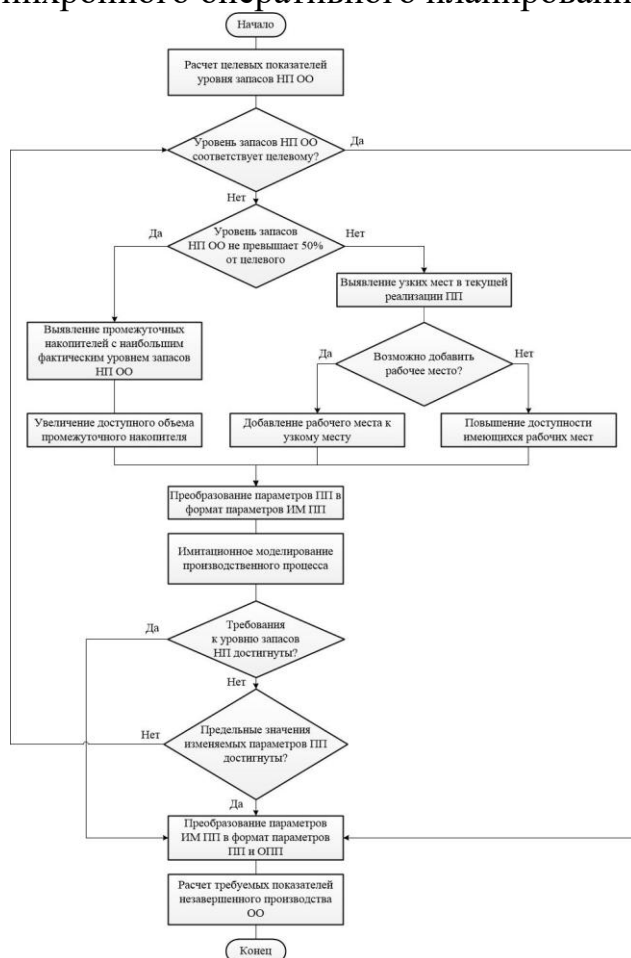


Рисунок 7 – Алгоритм синхронного оперативного планирования монтажно-сборочных процессов

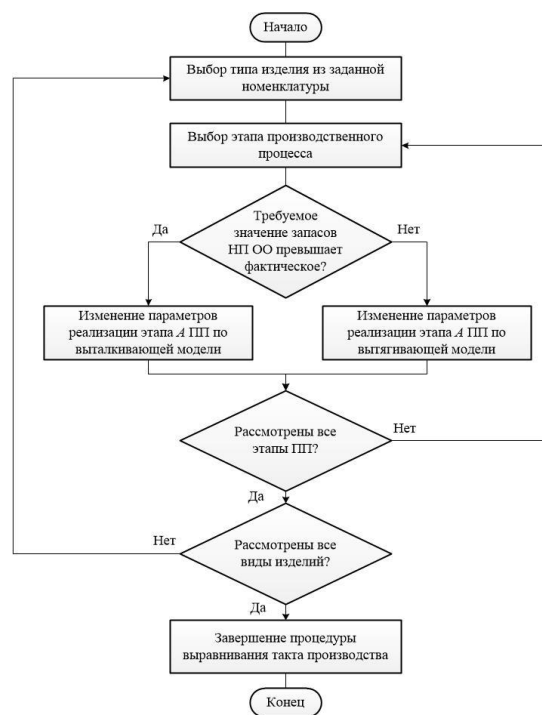


Рисунок 8 – Алгоритм выравнивания такта производства

Алгоритм метода синхронного оперативного планирования представлен на рис. 7. Он запускает процедуру выравнивания такта производства с использованием выталкивающей и вытягивающей моделей производственного процесса. Завершается процесс синхронного планирования внесением изменений в текущую реализацию оперативно-производственного плана с учетом результатов выполнения процедур

синхронного производственного планирования и выравнивания такта производства (рис.8).

Для апробации автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов был выбран цикл производства комплекта деталей Э 4010-20-0042 на радиоэлектронном производстве АО «НПП «Радиосвязь».

Таблица 2 – Значения ключевых показателей до и после внедрения системы

Улучшаемые показатели:	До	После
Сокращение времени производственного цикла(минуты)	3980,73	3684,67
Выработка (шт./человек в месяц)	2,02	2,12
Сокращение незавершенного производства (штуки)	732	703

Использование разработанной системы позволило сократить длительность производственного цикла на 8%, повысить производительность рабочих мест на 5% и сократить количество незавершенного производства на 4%, что говорит о повышении эффективности монтажно-сборочных процессов радиоэлектронной аппаратуры после внедрения автоматизированной системы.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы.

В **приложении** представлены имитационная модель монтажно-сборочных процессов, набор данных о технологических процессах монтажно-сборочного цеха, свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности, а также акты о внедрении научных и практических результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

В ходе выполнения диссертационной работы проведен комплекс исследований, направленных на повышение эффективности МСП производства радиоэлектронной аппаратуры. В ходе проведенного исследования получены следующие выводы и результаты:

1. Выполнен анализ методов повышения эффективности монтажно-сборочных процессов приборостроительного предприятия. Обоснована необходимость разработки методов, позволяющих автоматизировать процесс оперативного планирования монтажно-сборочных операций. Сформулирована математическая задача оперативного планирования.

2. Предложен метод мониторинга МСП, позволяющий обеспечить оперативный анализ узких мест, что позволяет повысить эффективность производственного процесса, уменьшить время производственного цикла, сократить число незавершенного производства.

3. Разработана имитационная модель монтажно-сборочного процессов для динамического управления ресурсами предприятия и решения задачи оперативного планирования. Применение модели позволяет проводить проверку реализуемости составленного производственного плана, а также рассчитать ожидаемые сроки выполнения заказа в идеальных условиях.

4. Предложен метод синхронного оперативного планирования МСП, синхронизирующий операции, выполняемые на рабочих местах за счет выравнивания такта на каждом этапе, позволяющий сократить задержки производства заказов, снизить простой оборудования, обеспечить равномерность его загрузки, выровнять производственный такт.

5. Разработано программное обеспечение автоматизированной системы планирования монтажно-сборочных процессов в виде комплекса программного обеспечения и проведена интеграция разработанного ПО с существующей АСУП на приборостроительном производстве. Оценка эффективности МСП показала, что применение разработанных методов позволило на 8% сократить длительность монтажно-сборочного цикла, повысить производительность рабочих мест на 5% и сократить объем незавершенного производства на 4%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 1.Русских П.А. Анализ решений для создания и реализации механизмов адаптивного планирования позаказного производства/ П.А Русских, Д.В. Капулин//Вестник МГТУ СТАНКИН, 2021. Т.1 №56. С. 46–50.(K2).
- 2.Русских П.А. Мультиагентная модель многономенклатурного мелкосерийного производства/ П.А Русских, Д.В. Капулин// Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021 № 21(4).С. 69–80.(K2).
- 3.Русских П.А. Разработка автоматизированной системы динамического картирования потока создания ценности/ П.А Русских, Д.В. Капулин, О.В.Дрозд, С.Ю. Смоглюк// Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 1. С. 67–80.(K1).
- 4.Русских П.А. Метод синхронного оперативно-производственного планирования многономенклатурного позаказного производства/ П.А Русских, О.В.Дрозд, Д.В. Капулин// Информационные технологии. 2023. Т 29 №1. С 39– 46.(K1).
5. Русских П.А.Автоматизированная система оперативной регистрации технических изменений предприятия радиоэлектронной промышленности/ Д.В. Капулин, М.С.Воронков, П.А Русских, О.В.Дрозд// Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2024 №24(1).С. 5–18. (K2).

Публикации, входящие в систему цитирования Scopus и WoS:

6. Russkikh P.A., Alikin N.N., Kapulin D.V. Value stream mapping method for development of a dynamic model of capacity utilization// Journal of Physics Conference Series, 2019, vol. 1353. doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012111.(Q4).
- 7.Noskova N.N., Kapulin D.V., Vinnichenko M.V., Russkikh P.A. Formation of initial date when planning for custom manufacturing// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol.734. doi:10.1088/1757-899X/734/1/012153. (Q4).

8. Kapulin D. V., Russkikh P.A. Analisis 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. (Q4).
9. Russkikh P.A., Kapulin D.V. Simulation modeling for optimal production planning using Tecnomatix software. Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol.1661. doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012188. (Q4).
10. Noskova N.N., Kapulin D.V., Russkikh P.A. Investigation synchronous planning methods efficiency in small-batch make-to-order production. Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 2094 no.4. doi:10.1088/1742-6596/2094/4/042032. (Q4).

Публикации в других изданиях:

11. Носкова Е. Е., Капулин Д. В., Русских П. А. Методы синхронного планирования для улучшения процессов позаказного производства: на пути к цифровой трансформации // Цифровизация. 2022. Т. 3, № 2. С. 41—48.
12. Русских П. А., Капулин Д. В., Дрозд О. В. Разработка имитационной модели для решения задач оперативного планирования мелкосерийного производства // Цифровизация. 2022. Т. 3, № 3. С. 17–25. <https://doi.org/10.37993/2712-8733-2022-3-3-17-25>. EDN: OTUNT
13. Русских П.А., Капулин Д.В., Модель метода синхронного планирования монтажно-сборочных процессов приборостроительного предприятия// Системы связи и радионавигации: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». Красноярск, 12-14 ноября 2024 г. /— Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2024. – С. 295—298.

Патенты и программы:

14. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ. Программа динамического формирования карты потока создания ценности/ Д.В.Капулин, С.Ю.Смоглюк, П.А.Русских, О.В.Дрозд, № 2022661968 от 28.06.2022.
15. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ. Программа формирования диаграммы Ганта по производственному заказу/Н.В. Романов, Д.В.Капулин, П.А. Русских, О.В.Дрозд, № 2022664429 от 29.07.2022.
16. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ Программа отслеживания и контроля передвижения изделия /Н.В. Романов, Д.В.Капулин, П.А. Русских, О.В.Дрозд, № 2022664430 от 29.07.2022.
17. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ Программа обработки технологической документации /Н.В. Романов, Д.В.Капулин, П.А. Русских, О.В.Дрозд, № 2022664936 от 08.08.22.
18. Метод синхронного производственного планирования и комплекс для его осуществления/ Д.В.Капулин, О.В. Дрозд, П.А. Русских// Патент РФ № 2795106 С1. – № 2022116518, заявл 17.06.22; опубл. 28.04.23.