

*На правах рукописи*



ШУТИКОВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ  
ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ОСОБО ОТВЕТСТВЕННОЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ**

Специальность: 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами»

**АВТОРЕФРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Феофанов Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Аверченков Андрей Владимирович**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий и систем, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск,

**Гаврюшин Сергей Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой РК9 компьютерных систем автоматизации производства ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», г. Тверь.

Защита состоится «26» декабря 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», [www.stankin.ru](http://www.stankin.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.332.02  
д.ф.-м.н., доцент



Елисеева Юлия Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В современных реалиях одним из основных аспектов является развитие перспективных технологий в производственных процессах и управленческих системах, что отражено в Программе развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года согласно Распоряжению от 28 июля 2017 года №1632-р.

Одним из актуальных направлений деятельности предприятия является внедрение автоматизированной системы управления производственными процессами на уровне структурных подразделений. Взаимосвязи между функциями предприятия и управляющими производственными системами установлены в положениях ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014 (ISA-95), которые определяют терминологию и модели, программные функции, физические модели производственных мощностей, производственные, технологические и другие процессы.

В отличие от крупносерийного и массового производства, где компенсация дефицита годных деталей решается за счет небольшого увеличения числа исходных заготовок, в производствах мелкосерийного типа задача своевременной компенсации дефицита до сих пор не решена.

Актуальность темы исследования заключается в создании модели интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами в условиях мелкосерийного производства, разработанной на основе технологического процесса изготовления и контроля параметров деталей после особо ответственной технологической операции (согласно ГОСТ Р 55753-2013) с целью обоснования значения коэффициента качества, входящего в состав общего показателя эффективности использования технологического оборудования, который характеризуется показателем Overall Equipment Effectiveness (ОЕЕ). Под качеством в данной работе понимается изготовление в срок заданного количества деталей, соответствующих технической документации (чертежи и планирование).

**Степень разработанности проблемы.** Вопросам разработки автоматизированных систем промышленных предприятий посвящены труды Соломенцева Ю. М., Митрофанова В. Г., Черпакова Б. И., Фролова Е. Б., Схиртладзе А. Г., Базрова Б. М., Загидуллина Р. Р., Хасцаев Б. Д., Кальмана Р., Фраминана Ж. и др.

Вопросы, связанные с разработкой элементов системы производственного планирования и управления технологическими процессами, нашли отражение в работах отечественных и зарубежных ученых, таких как Албагачиев А. Ю., Капитанов А. В., Мезенцев Ю. А., Адлер Ю. П., Смирнов Н. В., Джонсон С. М., О'Лири Д., Шухарт У. и др.

Однако вопрос исследования влияния коэффициента качества на выпуск годной продукции при внедрении интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами при контроле деталей после особо ответственной технологической операции недостаточно изучен.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности управления технологическим процессом изготовления годной продукции мелкосерийного производства путем использования интегрированной автоматизированной системы, позволяющей своевременно обнаружить дефектные детали после особо ответственной технологической операции и коррекции текущего производственного расписания.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие **задачи**:

- анализ существующих автоматизированных систем управления производственными процессами в мелкосерийном производстве;
- выявление связи между обнаружением дефектных деталей после особо ответственной технологической операции и корректировкой производственного расписания, а также установление зависимости между увеличением значения коэффициента качества и своевременной компенсацией дефицита годной продукции;
- разработка модели интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами для компенсации дефицита при обнаружении дефектных деталей в партии и ее формальное описание;
- разработка алгоритма управления производственным процессом в мелкосерийном производстве с учетом выявленных дефектных деталей при последовательном способе организации их движения;
- разработка методических рекомендаций, которые могут быть применены для предприятий с мелкосерийным типом производства, а также в учебном процессе по дисциплине «Управление жизненным циклом изделий» при подготовке магистров по направлениям «Управление качеством в автоматизированных производственных системах», «Интегрированные системы управления цифровыми производствами и предприятиями», «Компьютерное моделирование сложных технических систем», «Методы и средства проектирования производственных систем».

**Объект исследования** – интегрированная автоматизированная система управления производственными процессами на основе данных контроля с дальнейшей корректировкой производственного расписания.

**Предмет исследования** – процедура своевременной компенсации дефицита деталей в условиях мелкосерийных машиностроительных производств.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:**

- установлена связь между обнаружением дефектных деталей после особо ответственной технологической операции и корректировкой производственного расписания, а также выявлена зависимость между увеличением значения коэффициента качества и своевременной компенсацией дефицита годной продукции;
- разработана модель интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами на основе обработки результатов контроля после особо ответственной технологической операции в целях своевременной компенсации дефицита годной продукции;

– предложен алгоритм управления производственными процессами в интегрированной автоматизированной системе с целью своевременной компенсации дефицита годной продукции при обнаружении дефектных деталей в партии после особо ответственной технологической операции при последовательном способе организации движения.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в разработке оригинальной модели интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами в целях своевременной компенсации дефицита годной продукции с применением высокоточного измерительного оборудования и использованием инструментов MES и системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).

**Практическая значимость исследования** состоит в:

– организации интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами, направленной на своевременное выявление дефектных деталей после особо ответственной технологической операции и корректировки производственного расписания;

– предложенных методических рекомендациях, которые были применены АО «ЦНИИАГ» и могут быть использованы для других предприятий с мелкосерийным типом производства, а также в учебном процессе по дисциплине «Управление жизненным циклом изделий» при подготовке магистров по программам «Управление качеством в автоматизированных производственных системах», «Интегрированные системы управления цифровыми производствами и предприятиями», «Компьютерное моделирование сложных технических систем», «Методы и средства проектирования производственных систем» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

**Положения, выносимые на защиту:**

– структурная схема взаимосвязей управления и функционирования производственных процессов при изготовлении партии деталей на мелкосерийном производстве;

– модель интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами на основе анализа результатов контроля после особо ответственной технологической операции в целях своевременной компенсации дефицита годной продукции;

– алгоритм функционирования интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами в целях своевременной компенсации дефицита годной продукции при обнаружении дефектных деталей в партии после особо ответственной технологической операции;

– влияние использования интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами на показатель общей эффективности оборудования.

**Методы исследования.** В работе использовались методы системного подхода, математической статистики, экспертных оценок и факторного анализа.

**Степень достоверности и апробации результатов.** Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждаются соответствием

экспериментальных и теоретических исследований, а также разработкой оригинальной модели интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами на основе результатов контроля после особо ответственной технологической операции.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: «International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2020)», Sevastopol, 07-11 сентября 2020 года; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020 (ICMTMTE 2020)»; Международная научно-практическая конференция «Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий» Белгород, 30 января 2019 года; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», Сочи, 25-29 марта 2019 года; II Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал», Вологда, 20 декабря 2019 г.; II Международная молодёжная конференция «Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники», Москва, 07-09 ноября 2018 года. Результаты исследования также рекомендовано применять в учебном процессе по дисциплине «Управление жизненным циклом изделий» при подготовке магистров по программам «Управление качеством в автоматизированных производственных системах», «Интегрированные системы управления цифровыми производствами и предприятиями», «Компьютерное моделирование сложных технических систем», «Методы и средства проектирования производственных систем».

**Публикации по теме работы.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 научные работы – в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 8 публикаций – в научных журналах и материалах конференции, 1 учебное пособие.

**Соответствие паспорту специальности.** Научная работа соответствует формуле научной специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» в пунктах 1, 4.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и содержит 163 страницы сквозной нумерации, включая 127 страниц основного текста, 23 страницы приложений, 1 страницу со списком сокращений, 35 Рисунков и 24 Таблицы. Список литературы содержит 90 наименований и занимает 12 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулирована актуальность работы, определены цели и задачи, решение которых необходимо осуществить, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения исследования.

**Первая глава** посвящена анализу автоматизированного управления производственными процессами, а также вопросам оценки эффективности рассмотренных систем.

Управление технологическим процессом становится все более сложным и характеризуется большим числом изменяющихся во времени характеристик, сложной связью между входными и выходными параметрами, необходимостью изготовления продукции согласно определенным в нормативно-технической документации требованиям.

На основе выявленных зависимостей рассмотрены задачи эффективного функционирования организации с помощью составления производственного расписания, проведен аналитический обзор наиболее распространенных автоматизированных систем управления производственными процессами, таких как MES-система «ФОБОС», Preactor, Ortems, PolyPlan, 1С: Предприятие MES Оперативное управление производством. Представленные системы являются наиболее используемыми в промышленности. Для определения наиболее подходящей MES-системы на предприятиях с последовательным типом производства с помощью экспертной оценки было проведено сравнение указанных систем с использованием балльного метода по заданным критериям, таким как функциональная полнота системы, простота обслуживания, стоимость, адаптированность к российским условиям производства, оперативность перерасчета производственного расписания и другие. По результатам проведенного анализа выявлено, что наиболее подходящей по заданным критериям является MES-система «ФОБОС».

Системы автоматизированного управления производственными процессами позволяют повысить эффективность функционирования технологических процессов предприятия в условиях постоянно увеличивающейся номенклатуры производимой продукции и изменяющихся требований заказчика. Для изготовления партии деталей в срок, согласно требованиям технической документации, прописанным в заявке заказчика, целесообразным является внедрить интегрированную автоматизированную систему управления производственными процессами. Система такого вида должна обладать способностью своевременно обнаруживать дефектные детали и корректировать производственное расписание таким образом, чтобы обеспечить выпуск годной продукции на заданном интервале планирования согласно требованиям заказчика в условиях мелкосерийного производства. Если не выявлять дефектные детали в ходе их изготовления на операциях технологического процесса, на последней технологической операции потенциально может возникнуть дефицит годных деталей. Для обеспечения соответствия всей партии деталей требованиям технической документации, данный дефицит необходимо устранять, что повлечет за собой дополнительные временные затраты и может привести к срыву установленных сроков. В случае, когда проводится контроль параметров деталей после особо ответственной технологической операции, появляется возможность своевременно исправлять дефектные детали (если дефект является устранимым) или изготавливать вместо

них новые (если дефект неустранимый) с помощью корректировки производственного расписания, что позволяет компенсировать дефицит годной продукции.

Для оценки эффективности предложенной системы был проведен анализ показателя общей эффективности технологического оборудования и выявлена зависимость между своевременной компенсацией дефицита годной продукции и увеличением значения коэффициента качества. Это позволило сформулировать цель работы и поставить задачи для ее достижения.

**Вторая глава** посвящена разработке модели интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами при обнаружении дефектных деталей в партии.

Обобщенная схема интегрированной автоматизированной системы управления производственными заказами представлена на Рисунке 1. При функционировании производственного предприятия генерируется информация о состоянии заказа, которая передается в систему управления производственными заказами и производит корректировку производственного расписания. Исходя из произведенной корректировки, происходит обеспечение ресурсами для дальнейшего функционирования предприятия. На выход системы поступают выполненные заказы.

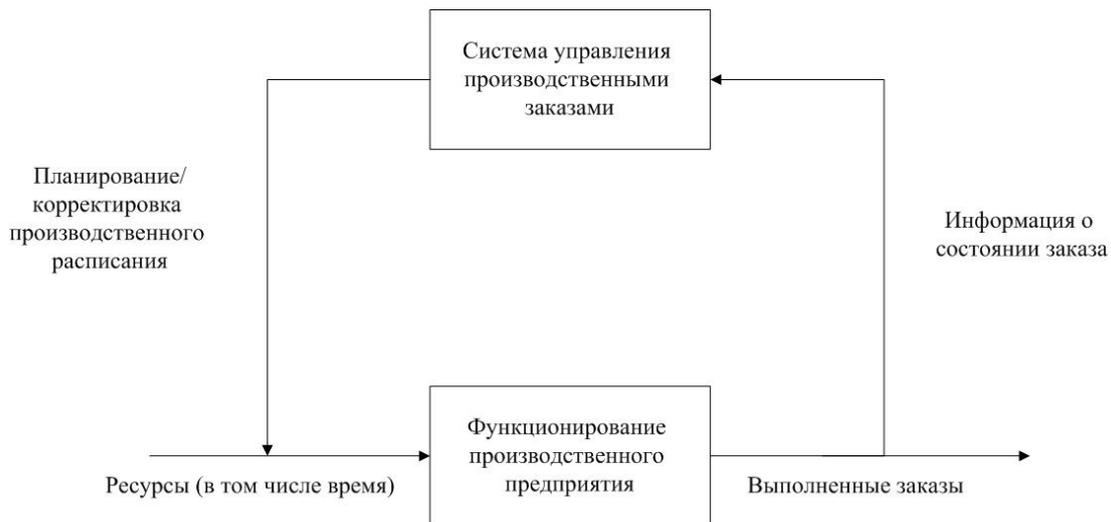


Рисунок 1 — *Обобщенная схема интегрированной системы управления производственными заказами*

На Рисунке 2 представлена структурная схема взаимосвязей управления и функционирования производственных процессов при изготовлении партии деталей на мелкосерийном производстве, состоящей из системы управления производственными заказами, в которой описываются блоки управления, обеспечения и проектирования заказа, а также системы функционирования, в которой описываются блоки изготовления, обеспечения ресурсами и проектирования заказа.

Компонент проектирования заказа (ФП) описывает составление технологического процесса при помощи САПР ТП. Входом для него является задание на выполнение заказа, поступающее из внешней среды, а выходом —

спроектированный технологический процесс. Данный процесс оказывает влияние и является входом для компонента обеспечения ресурсами заказа (ФР), который описывает используемое оборудование, используемое сырье и электроэнергию. Выходом для данного компонента являются установленные требования к ресурсам, необходимым для реализации изготовления заказа. В свою очередь, компонент изготовления заказа (ФМ) характеризует непосредственно процесс изготовления партии деталей – технологические операции, их последовательность, длительность. Выходом компонента является готовый заказ, передаваемый во внешнюю среду.

На каждый из описанных компонентов оказывает влияние соответствующий компонент системы управления производственными процессами. Компонент управления проектом заказа характеризует процесс возможного изменения технологического процесса исходя из потенциальной необходимости (закупка нового оборудования, необходимость перепланировки цеха и т.д.). Компонент управления обеспечением заказа (УР) характеризует возможность изменять посредством MES-системы количество ресурсов (в том числе количество используемого оборудования), необходимых для реализации изготовления заказа. Наконец, компонент управления изготовлением заказа (УМ) характеризует возможность перерасчета производственного расписания при помощи MES-системы, исходя из складывающейся производственной ситуации (в том числе и при обнаружении дефектных деталей в изготавливаемой партии после особо ответственной технологической операции). Каждый компонент получает обратную связь от соответствующих компонентов функционирования.

На Рисунке 2:

- 1 – информация о состоянии изготовления и контроля партии деталей после особо ответственной технологической операции;
- 2 – информация о корректировке производственного расписания;
- 3 – информация о состоянии обеспеченности ресурсами при получении заказа на изготовление партии деталей;
- 4 – информация о корректировке планов обеспеченности заказов (требуемые сроки по требуемым видам ресурсов);
- 5 – информация о состоянии проектирования заказа;
- 6 – информация о корректировке технологического процесса;
- ФМ – компонент, характеризующий функцию изготовления заказа;
- ФР – компонент, характеризующий функцию обеспечения ресурсами заказа;
- ФП – компонент, характеризующий функцию проектирования заказа;
- УМ – компонент, характеризующий управление изготовлением заказа;
- УР – компонент, характеризующий управление обеспечением заказа;
- УП – компонент, характеризующий управление проектом заказа.

В системном подходе рассматривается комплекс взаимосвязанных элементов. Элементы системы, описывающие производственные процессы в мелкосерийном производстве, являются неоднородными, что приводит к выделению разных множеств.

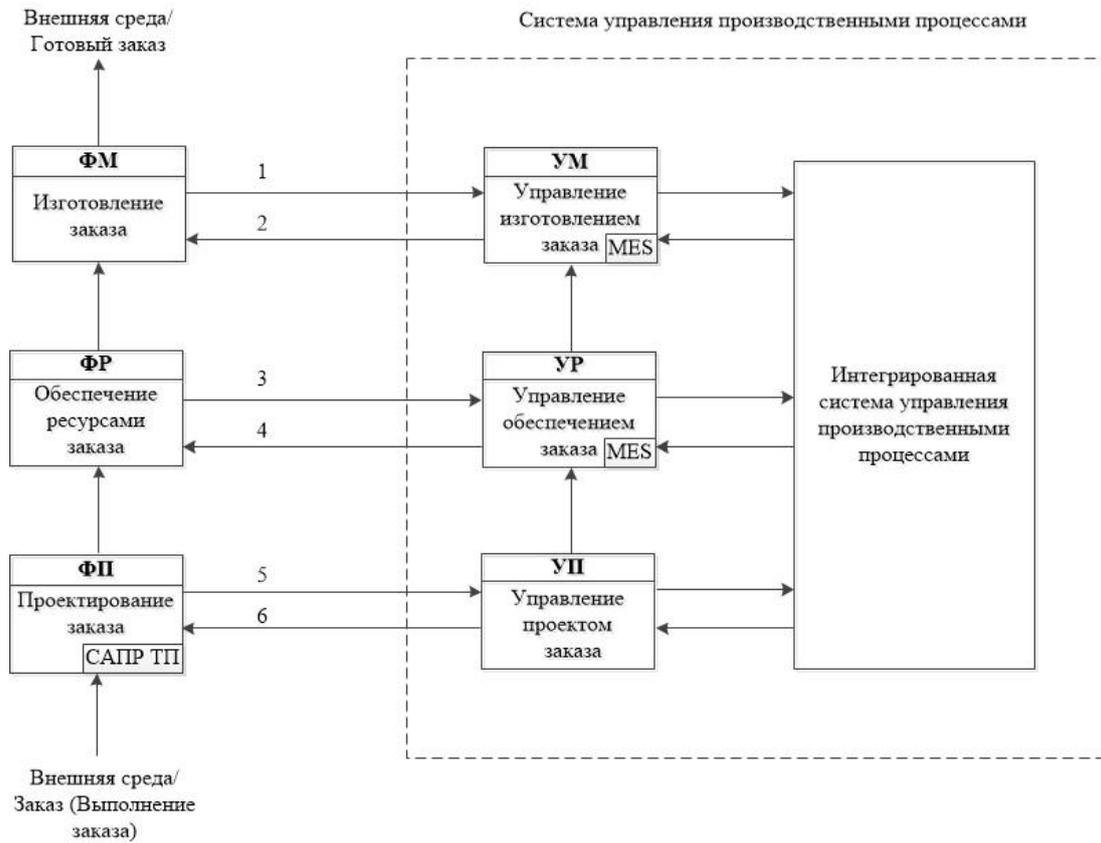


Рисунок 2 – Структурная схема взаимосвязей управления и функционирования производственных процессов при изготовлении партии деталей на мелкосерийном производстве

В общем виде формальное описание системы в аспекте функционирования при изготовлении партии деталей на мелкосерийном производстве можно представить как:

$$L_1^\Phi = \langle z^\Phi, a^\Phi, q(z^\Phi), q(a^\Phi), O_1^\Phi \rangle, \quad (1)$$

где  $z^\Phi$  — структура процесса функционирования;  $a^\Phi$  — множество входных и выходных объектов, участвующих в процессе функционирования при изготовлении партии деталей;  $q(z^\Phi)$  — множество различных свойств, описывающих элементы структуры технологического процесса;  $q(a^\Phi)$  — множество различных свойств, описывающих множество входных и выходных объектов, участвующих в процессе функционирования при изготовлении партии деталей;  $O_1^\Phi$  — множество связей между компонентами системы  $L_1^\Phi$ .

При анализе системы нужно также учитывать и окружающие условия, влияющие на нее, такие как электроснабжение предприятия, сроки, установленные заказчиком, поставка сырья и т.д. Для этого приведено формальное описание рассматриваемой системы и окружающих условий. Формальное описание системы с учетом окружающих условий принимает вид:

$$L_2^\Phi = \langle L_1^\Phi, \Theta^\Phi, O_2^\Phi \rangle, \quad (2)$$

где  $\Theta^\Phi$  – окружающие условия функционирования,  $O_2^\Phi$  - множество связей между компонентами системы и окружающие условия.

В аспекте управления формальное описание системы можно представить следующим образом:

$$L_1^y = \langle z^y, a^y, q(z^y), q(a^y), O_1^y \rangle, \quad (3)$$

где  $z^y$  – структура управления технологическим процессом;  $a^y$  – множество входных и выходных объектов;  $q(z^y)$  – множество различных свойств, описывающих элементы структуры управления технологического процесса;  $q(a^y)$  – множество различных свойств, описывающих множество участвующих в процессе управления объектов;  $O_1^y$  – множество связей между компонентами системы.

В аспекте управления формальное описание системы с учетом окружающих условий управления можно представить следующим образом:

$$L_2^y = \langle L_1^y, \Theta^y, O_2^y \rangle, \quad (4)$$

где  $\Theta^y$  – окружающие условия,  $O^y$  – множество связей между компонентами системы и окружающие условия управления.

Аналогично было выполнено формальное описание каждого из представленных на Рисунке 2 компонентов.

На Рисунке 3 представлена модель интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами, где  $X_1 - t_{npne_{rgk}}$  – информация о затратах времени, связанная с наличием переналадочных операций технологического оборудования во время поступления новых операций над партиями деталей (позиция ФМ на Рисунке 2);  $X_2 - t_{npe_{rgk}}^{\Sigma}$  – информация о временных потерях (затратах), образующихся из-за ожидания партий деталей, обрабатываемых в текущий момент времени на предыдущей операции (позиция 1 на Рисунке 2);  $X_3 - t_{nde_{rgk}}$  – информация о затратах времени, образующихся в связи с перемещением деталей между технологическим оборудованием (позиция 1 на Рисунке 2);  $X_4 - t_{nce_{rgk}}$  – информация о временных потерях (затратах), связанных с обеспечением сырья, оснастки и инструмента (позиция ФР на Рисунке 2);  $X_5 - t_{оде_{rgk}}$  – информация о временных потерях (затратах), связанных с устранением дефектных деталей (позиция 1,2 на Рисунке 2);  $X_6 - t_{онде_{rgk}}$  – информация о времени обработки или измерения партии деталей на  $k$ -ом станке или высокоточном измерительном оборудовании (позиция 5, 6 на Рисунке 2);  $W_1$  – перерасчет производственного расписания в случае, если дефект устраним (позиция 2 на Рисунке 2);  $W_2$  – перерасчет производственного расписания в случае, если дефект не устраним (позиция 2 на Рисунке 2);  $Y_1$  – информация об устранимом дефекте (позиция 1 на Рисунке 2);  $Y_2$  – информация о неустраняемом дефекте (позиция 1 на Рисунке 2); КИМ – координатно-измерительная машина (позиция ФМ на Рисунке 2);  $C_1$  – информация о технологических операциях (позиция ФП на Рисунке 2);  $C_n$  – информация об особо ответственной технологической операции (позиция ФМ на Рисунке 2);  $C_{n+1}$  – информация о следующих операциях после контрольной (позиция ФП на Рисунке 2),  $K_0$  – контрольная операция (позиция ФМ на Рисунке 2).

Данная модель применима для любого технологического процесса, в котором назначается особо ответственная технологическая операция.

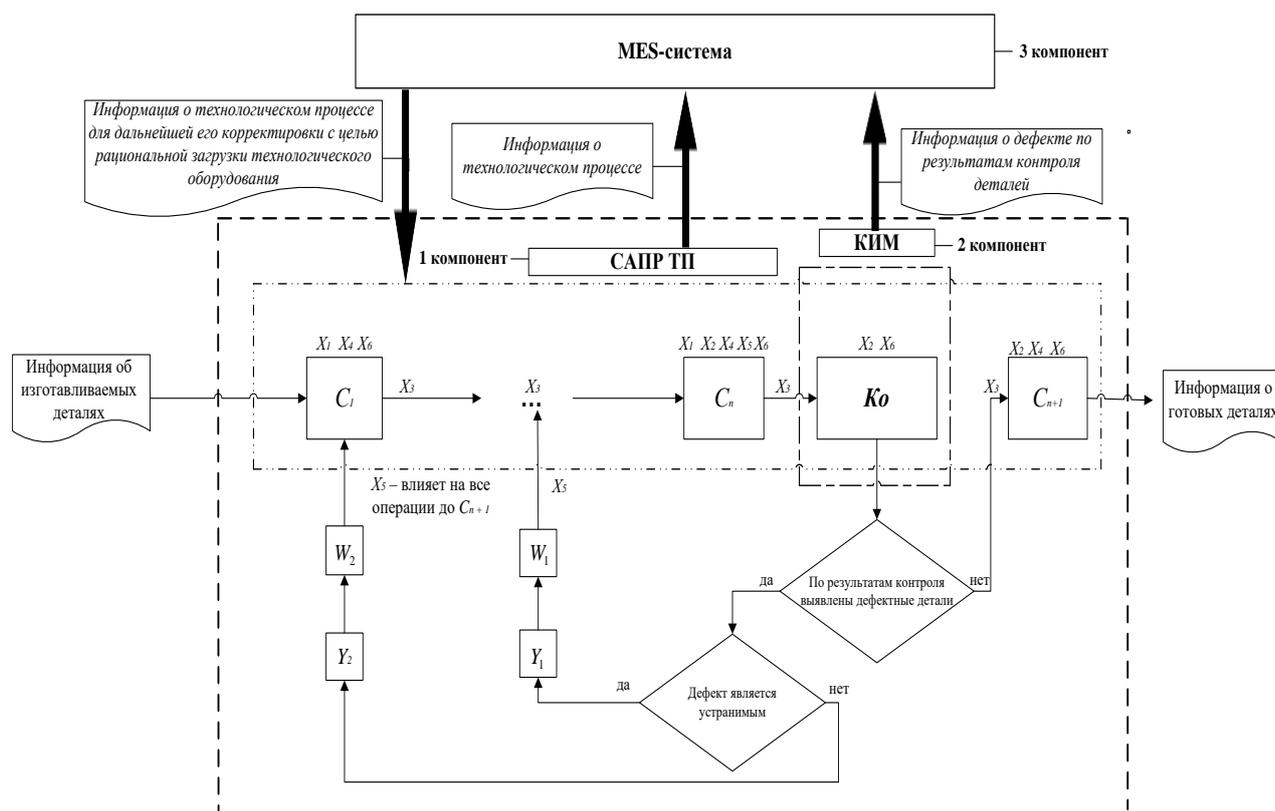


Рисунок 3 – Модель интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами

Представленная модель состоит из входа, который характеризует информацию об изготавливаемых деталях, и трех компонентов, которые позволяют обмениваться информацией для выработки рационального решения в целях выпуска готовой продукции согласно технической документации. Первым компонентом является САПР ТП, который содержит информацию о технологических операциях. Вторым компонентом является координатно-измерительная машина, располагаемая в технологическом процессе после особо ответственной технологической операции, согласно ГОСТ Р 55753-2013. Данный компонент описывает информацию о параметрах деталей после контрольной операции. Третьим компонентом является автоматизированная система управления производственными процессами MES-система, позволяющая компенсировать дефицит годных деталей, тем самым обеспечивая возможность получить после последней технологической операции партию годных деталей.

В указанную систему интегрируется информация о технологическом процессе из САПР ТП и информация о параметрах деталей от измерительного оборудования, в том числе от координатно-измерительной машины. В том случае, если детали являются годными, информация об этом передается далее на следующую операцию технологического процесса. Если детали являются дефектными, определяется степень их дефекта. Если имеется возможность доработать деталь, то дефект является устранимым, если такой возможности нет, дефект является неустранимым. В случае, если дефект является устранимым, то деталь отправляется на соответствующую технологическую операцию, а информация об этом

передается в MES-систему для рациональной загрузки технологического оборудования. Если же дефект является неустранимым, то информация об этом является обоснованием необходимости изготовления новой детали взамен дефектной. Выходом является информация о партии готовых деталей, изготовленных в срок согласно требованиям технической документации, прописанных в заявке заказчика. В случае, если дефектные детали обнаружены на ранней стадии технологического процесса, изготовление всей партии в срок становится возможным благодаря коррекции производственного расписания. Если же дефект обнаружен на поздних стадиях технологического процесса и, следовательно, нет возможности изготовить недостающее количество деталей в срок, то необходимое число деталей забирается из следующей партии. В этом случае MES-система обрабатывает информацию и на ее основе рассчитывает производственное расписание таким образом, чтобы компенсировать получившийся дефицит годных деталей в следующей партии.

Рассматриваемая интегрированная автоматизированная система позволяет своевременно отслеживать обнаружение дефектных деталей путем контроля их параметров после особо ответственной технологической операции, и, в случае обнаружения в партии дефектных деталей, корректировать производственное расписание таким образом, чтобы компенсировать дефицит годных деталей.

Однако возникают ситуации, когда особо ответственная технологическая операция определена таким образом, что если после нее обнаруживается дефект, то невозможно запустить выпуск новых деталей взамен дефектных или наладить их доработку. Эту ситуацию можно охарактеризовать как «точку невозврата», так как становится невозможным компенсировать дефицит партии годных деталей и выпустить продукцию в срок. Для определения «точки невозврата» при компенсации брака изготовления партии деталей на этапе планирования возможно использовать причинно-следственную диаграмму, ограничивающую время возможной компенсации брака.

Алгоритм определения точки невозврата на сегодняшний день не создан. Разные партии деталей имеют свои точки невозврата. Такая научная задача, имеющая в своей основе многофакторный параметрический анализ, требует фундаментального исследования.

Ниже приведены показатели эффективности производственной системы, на основании которых можно оценить внедрение интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами. Одним из показателей, характеризующих технологический процесс, является показатель общей эффективности оборудования. Данный показатель состоит из трех сомножителей, таких как коэффициент времени  $K_{вр}$  (доступность), коэффициент производительности  $K_{пр}$  (эффективность работы), коэффициент качества  $K_{кач}$  (уровень качества), согласно формуле (5):

$$OEE = K_{вр} K_{пр} K_{кач} = \frac{\sum_j (\Phi_{врj} - Пp_j)}{\sum_j \Phi_{врj}} \frac{\sum_i T_i B_{ырi}}{\sum_j (\Phi_{врj} - Пp_j)} \frac{\sum_i T_i (B_{ырi} - B_i)}{\sum_i T_i B_{ырi}}, \quad (5)$$

где  $j$  – количество единиц оборудования;  $\Phi_{врj}$  – фонд времени работы  $j$ -ой единицы оборудования (длительность смены, иногда берут 24 часа в сутки);  $Прj$  – простой  $j$ -ой единицы оборудования, в том числе и плановые (обеда, регламентированные перерывы, ППР, наладка и т.д.);  $i$  – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования,  $T_i$  – такт выпуска  $i$ -ого продукта,  $Выр_i$  – количество изготовленного  $i$ -ого продукта в течение  $\Phi_{вр}$ ;  $B_i$  – количество брака  $i$ -ого продукта, изготовленного в течение  $\Phi_{вр}$ ;  $\sum_j (\Phi_{врj} - Прj)$  – количество времени, имеющегося для выпуска продукции на  $j$ -ой единице оборудования;  $\sum_i T_i Выр_i$  – количество времени, потраченного на производство продукции;  $\sum_i T_i (Выр_i - B_i)$  – количество времени, потраченного на производство годной продукции.

Еще одним показателем является показатель, характеризующий скорость прохождения деталей через конкретные производственные участки (Manufacturing Cycle Effectiveness), формула (6) которого приведена ниже:

$$MCE_{ik} = \frac{T_{ik} Выр_{ik}}{\sum_j \Phi_{врj}}, \quad (6)$$

где  $Выр_{ik}$  – выработка  $k$ -ого производственного участка по деталям, входящим в  $i$ -й продукт;  $T_{ik}$  – такт выпуска  $i$ -ой продукции на участке  $k$ ;  $\Phi_{врj}$  – фонд времени работы  $j$ -ой единицы оборудования (время рабочей смены).

Наилучшим вариантом управления производством является одновременное увеличение общей эффективности технологического оборудования ОЕЕ и показателя МСЕ, что приводит к заметному повышению эффективности работы предприятия. Данная задача является многокритериальной и не рассматривалась в данной работе, так как производство является мелкосерийным, в связи с чем решается задача увеличения только значения коэффициента качества показателя общей эффективности оборудования, формула расчета которого (7) представлена ниже:

$$K_{кач} = \frac{\sum_i T_i (Выр_i - B_i)}{\sum_i T_i Выр_i}, \quad (7)$$

где  $\sum_i T_i (Выр_i - B_i)$  – количество времени, потраченного на производство годной продукции;  $\sum_i T_i Выр_i$  – общее количество времени, потраченного на производство продукции;  $B_i$  – количество брака  $i$ -ого продукта изготовленного в течение  $\Phi_{вр}$ ;  $T_i$  – такт выпуска  $i$ -ого продукта.

Таким образом, разработанная модель интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами позволяет компенсировать дефицит годной продукции на выходе технологического процесса путем перерасчета производственного расписания и изготовления новых деталей взамен дефектных или их доработки. Это позволяет перейти к созданию интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами.

**Третья глава** посвящена созданию алгоритма управления интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами. Существуют несколько способов организации движения деталей на производстве: последовательный, параллельный и последовательно-параллельный.

При мелкосерийном типе производства применяется последовательный способ организации движения деталей. Изделия обрабатываются партиями, каждая последующая операция начинается после окончания обработки всей партии деталей на предыдущей операции. При обнаружении после особо ответственной технологической операции дефектных деталей, информация об этих деталях передается в MES-систему, где в дальнейшем пересчитывается производственное расписание исходя из степени дефекта. При этом возможны два варианта: а) если срок сдачи партии позволяет и есть свободное технологическое оборудование, то дефект исправляется или изготавливается недостающее количество деталей; б) если обработка всей партии деталей не укладывается в срок, регламентированный в техническом задании, то необходимое количество деталей изымается из следующей партии.

Если особо ответственная технологическая операция определена таким образом, что при обнаружении дефекта нет возможности произвести перерасчет производственного расписания таким образом, чтобы обеспечить изготовление всей партии деталей в срок, то наблюдается ситуация «точки невозврата». Она характеризуется тем, что нет возможности компенсировать дефицит деталей из следующей партии, а также нет возможности изготовить новые детали взамен недостающих, так как в этом случае будет сорван срок сдачи продукции.

Параллельный и параллельно-последовательный способы применяются при крупносерийном и массовом типах производства, которые не рассматриваются в работе.

Ниже на Рисунке 4 представлен алгоритм управления производственным процессом в мелкосерийном производстве с учетом выявленных дефектных деталей при последовательном способе организации движения деталей.

На Рисунке 4:  $G_1$  – выполнение первой технологической операции;  $C_n$  – выполнение особо ответственной технологической операции;  $Ko$  – проведение контрольной операции;  $G_{n+1}$  – выполнение последующих операций после контрольной;  $W_1$  – перерасчет производственного расписания в случае, если дефект устраним;  $W_2$  – перерасчет производственного расписания в случае, если дефект неустраним.

Учитывая приведенную в алгоритме информацию, рассмотрены составляющие разрабатываемой интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами и их взаимодействие между собой.

На Рисунке 5 представлена схема визуализации взаимосвязей компонентов интегрированной автоматизированной системы перерасчета производственного расписания в случае обнаружения дефектной продукции после особо ответственной технологической операции.

Взаимодействие САПР ТП и MES-системы на основе передачи данных о результатах контроля реализуется следующим образом: средствами САПР ТП было реализовано автоматизированное рабочее место (АРМ) технолога и АРМ

мастеров участков. Реализован выход на MES-систему, так как после выполнения каждой операции MES-системе необходима информация об итогах обработки: количество годных и забракованных деталей, как показано на Рисунке 6. Такая информация поступает в MES-систему от высокоточного измерительного оборудования посредством передачи электронного протокола измерений партии деталей. Высокоточное измерительное оборудование при помощи программного обеспечения формирует протокол, в котором указывается параметр, по которому обнаружено несоответствие и степень дефекта. На основании информации из протокола контролер вносит в MES-систему информацию о дефектном параметре, обнаруженном после ответственной технологической операции. Соответствующая коррекция вносится и в текущий оперативный план производства для компенсации возникшего дефицита, и формируется рабочий наряд. Взаимосвязь работы САПР ТП и высокоточного измерительного оборудования состоит в том, что именно технолог обязан подробно расписать при проектировании ТП действия при контрольной операции: какие именно контролируемые размеры следует проверять, с помощью каких средств измерения проводить контроль.

Результаты контроля представляют интерес и для технолога: он может видеть результаты выполнения ТП, спроектированного им. Благодаря тому, что обеспечивается обратная связь и от станков, и от высокоточного измерительного оборудования, начальник цеха получает оперативную информацию о текущей производственной ситуации от MES-системы.

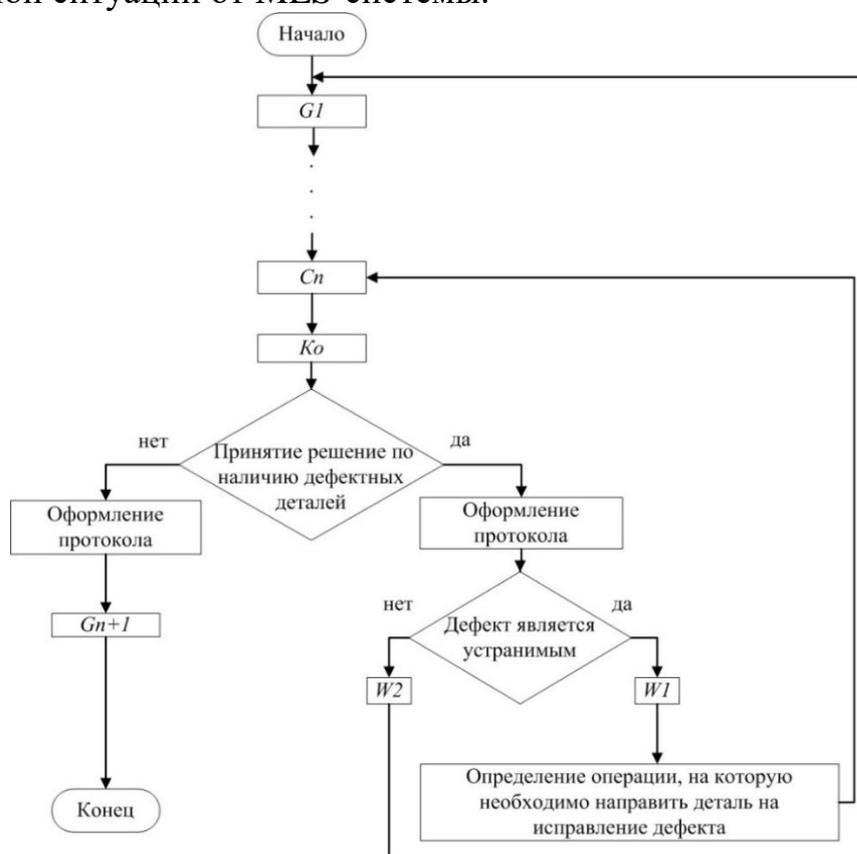


Рисунок 4 – Алгоритм управления производственным процессом в мелкосерийном производстве с учетом выявленных дефектных деталей при последовательном способе организации движения

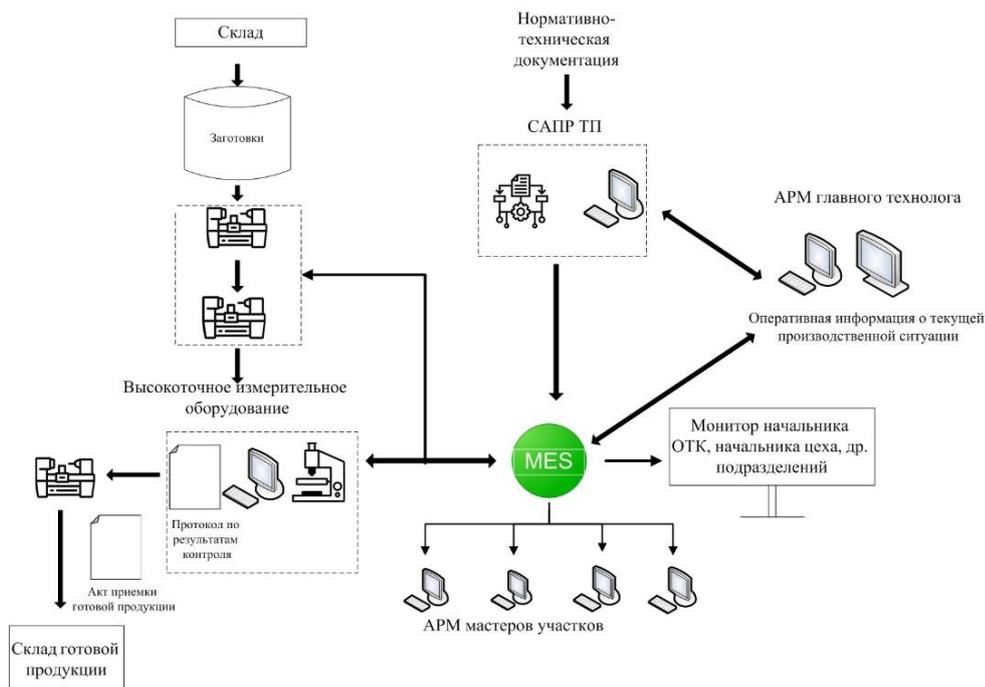


Рисунок 5 – Визуализация взаимосвязей компонентов интегрированной автоматизированной системы перерасчета производственного расписания

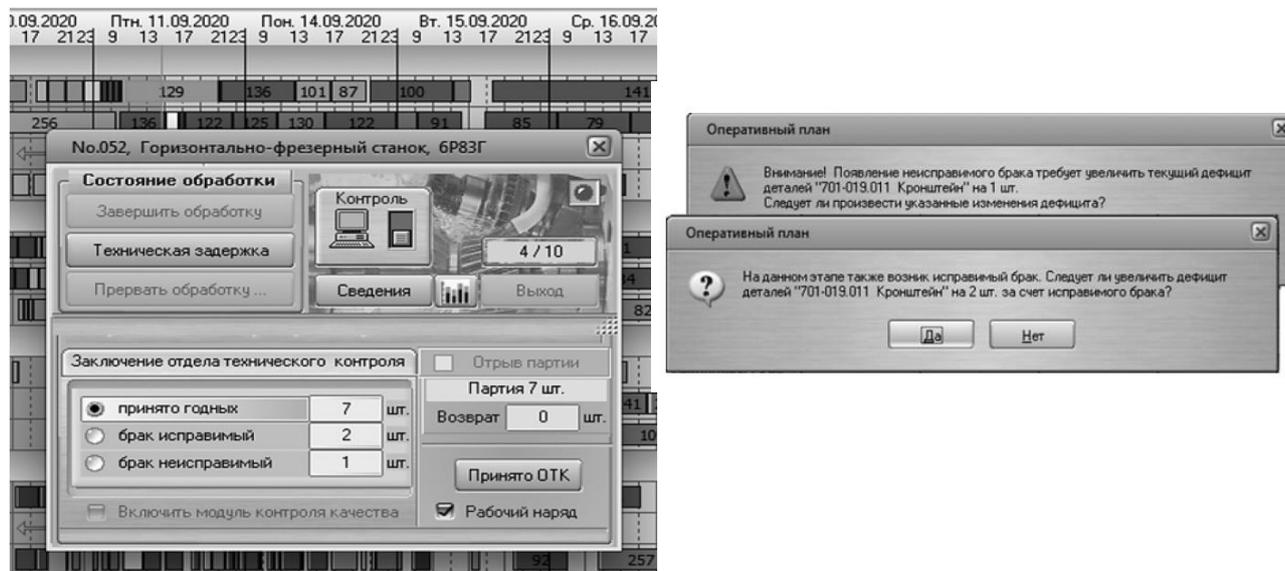


Рисунок 6 – Интерфейс внесения информации о количестве дефектных деталей

Для разработки технологического процесса и изготовления партии деталей была использована САПР ТП «ТЕМП». По результатам разработанного технологического процесса в автоматизированном режиме формируется технологическая карта, фрагмент которой представлен на Рисунке 7.

Операция № 115 в данной технологической карте является контрольной. Эта операция характеризуется использованием КИМ для контроля параметров деталей.

Еще одним компонентом интегрированной автоматизированной системы является MES-система. Используя информацию, поступающую от САПР ТП «ТЕМП» и КИМ, MES-система «ФОБОС» формирует производственное расписание, фрагмент которого представлен в виде диаграммы Ганта на Рисунке 8.

ФОРМА 16 САПР																
Дубл.																
Взам.																
Подл.	T															
										02100.00000	4					
										2МЗУ010						
A	Цех	Уч	ФМ	Опер.	Код, наименование операции				Обозначение документа							
B	Код, наименование оборудования				СМ	Проф	P	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	К шт.	Тп.э.	Т шт.	
К/М	Наименование детали, сб. единицы или материала				Обозначение, код				ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н расх			
B 01	Верстак														2	15
A 02	090 4114 Токарно-винторезная ИОТ N1															
B 03	Токарно-винторезный станок 16К20														5	45
A 04	095 0108 Слесарная ИОТ№5															
B 05	Верстак слесарный														1	12
A 06	100 4221 Горизонтально-расточная ИОТ №1															
B 07	Горизонтально-расточной станок 06 В														3	30
A 08	105 0108 Слесарная ИОТ№5															
B 09	Верстак слесарный														1	9
A 10	110 0106 Выдержка															
B 11	Остатка для измерения детали								10						3	90
A 12	115 0235 Контроль ИОТ №24															
13	соосности(концентр-ти)															
B 14	Координатно-измерительная машина								10						5	20
A 15	120 4114 Токарно-винторезная ИОТ N1															
B 16	Токарно-винторезный станок 16К20														5	45
A 17	125 4268 Гравировально-фрезерная ИОТ №4															
МК																5

Рисунок 7 – Фрагмент технологической карты, составленной в САПР ТП «ТЕМП»

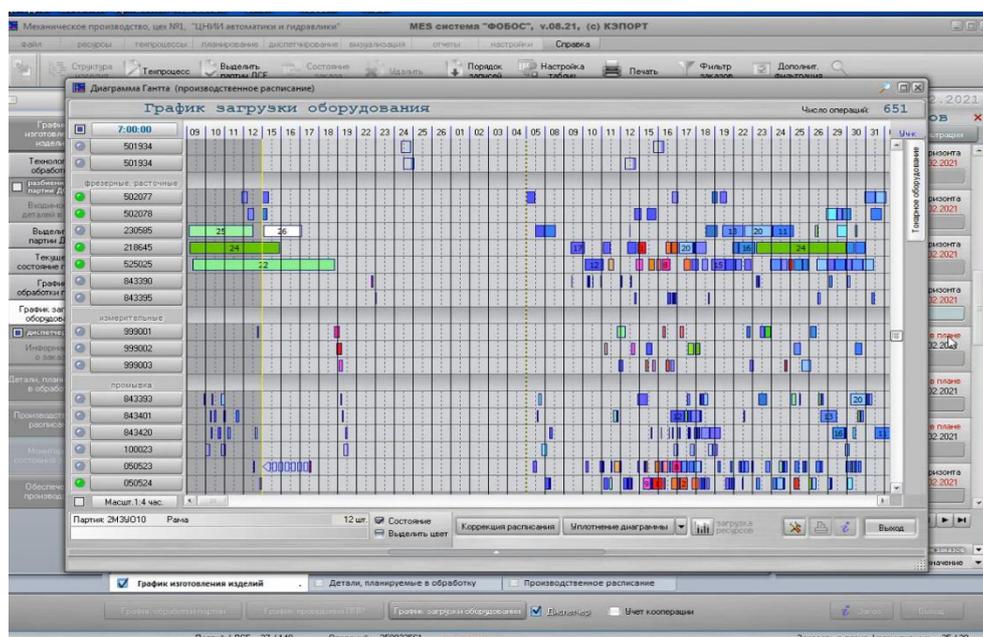


Рисунок 8 – Фрагмент производственного расписания, формируемого MES-системой «ФОБОС» по результатам информации, поступающей от КИМ и САПР ТП «ТЕМП»

В итоге MES-система получает данные как от КИМ, так и от САПР ТП и, в свою очередь, в случае обнаружения дефектных деталей, позволяет оперативно корректировать производственное расписание, что позволяет обеспечить выпуск партии годных деталей согласно технической документации.

Таким образом, MES-система получает данные как от КИМ, так и от САПР ТП и, в свою очередь, в случае обнаружения дефектных деталей позволяет оперативно корректировать производственное расписание, что обеспечивает выпуск партии годных деталей согласно технической документации. Создание

данной системы позволило перейти к оценке повышения эффективности производственного процесса.

**В четвертой главе** проведена оценка повышения эффективности производственного процесса при внедрении интегрированной автоматизированной системы.

Внедрение рассматриваемой системы позволяет оперативно обнаружить дефектные детали и обеспечить соблюдение сроков изготовления всей партии согласно требованиям заказчика. Для визуализации временных затрат на изготовление партии деталей приведен график вариантов с применением интегрированной автоматизированной системы и без нее, представленный на Рисунке 9.

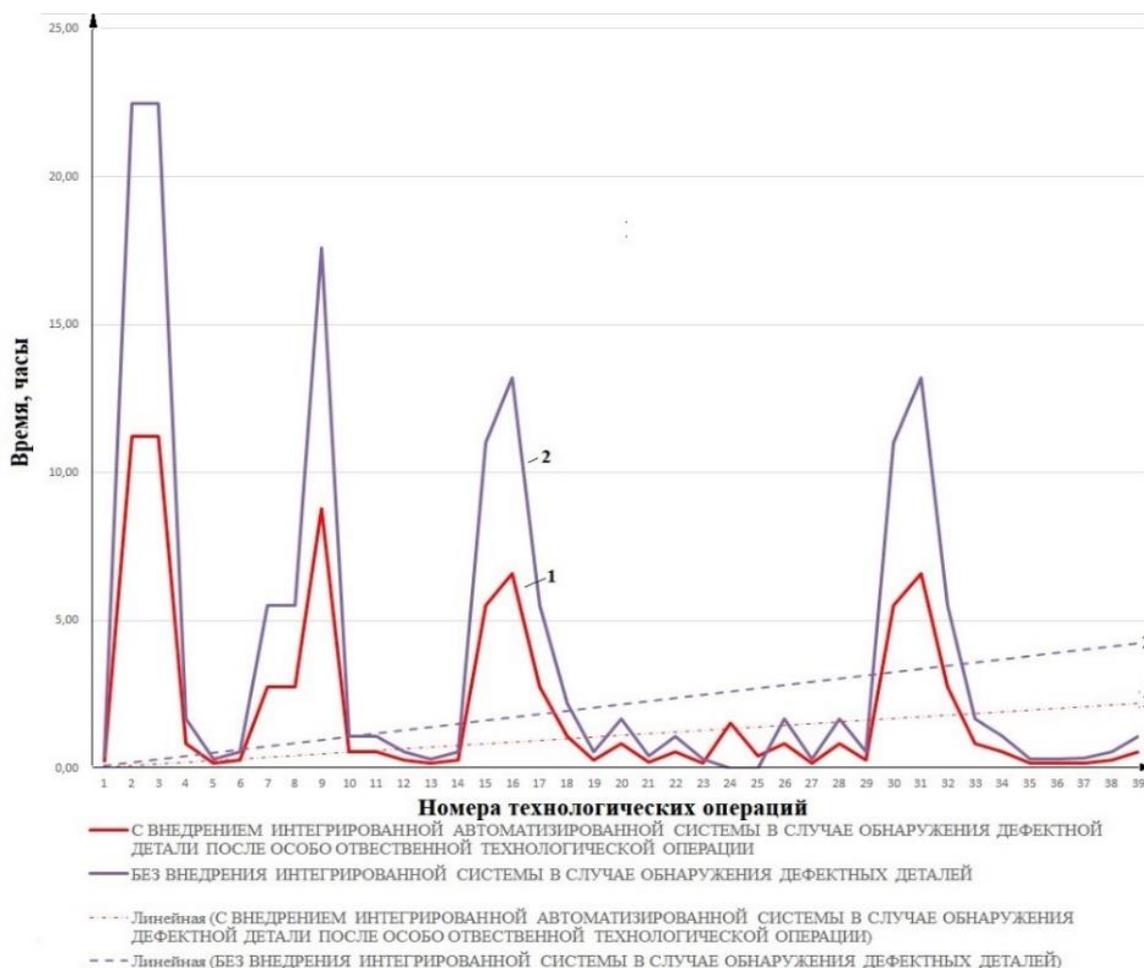


Рисунок 9 – Сравнительная диаграмма вариантов внедрения интегрированной автоматизированной системы и без нее

На графике представлены две различные ситуации технологического процесса изготовления деталей. Для более наглядной визуализации временных затрат каждого из вариантов технологического процесса проведена линейная аппроксимация, которая характеризуется двумя пунктирными линиями тренда. Первая линия визуализирует ситуацию при внедрении данной системы в случае обнаружения дефектных деталей после особо ответственной технологической операции. Вторая линия характеризует ситуацию технологического процесса с обнаружением дефектных деталей на последней технологической операции без

применения интегрированной автоматизированной системы.

По результатам анализа диаграммы можно сделать вывод о том, что внедрение интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами позволяет в случае обнаружения дефектных деталей соблюсти сроки изготовления всей партии деталей согласно техническому заданию. Без применения данной системы в случае обнаружения дефектных деталей время изготовления значительно увеличивается, что может привести к срыву установленных сроков.

В качестве примера произведена оценка повышения коэффициента качества при внедрении рассматриваемой интегрированной автоматизированной системы. Для этого проведено моделирование ситуации обнаружения в партии из 12 штук на ответственной операции 3 дефектных деталей и при общем времени изготовления всей партии 864 минут, коэффициент качества рассчитывается следующим образом:

$$T_i = \frac{864}{12} = 72 \text{ мин}$$

$$\sum_i [T_i (B_{\text{выр } i} - B_i)] = 648 \text{ мин} \quad (8)$$

$$\sum_i [T_i B_{\text{выр } i}] = 864 \text{ мин} \quad (9)$$

$$K_{\text{кач1}} \approx 0,75$$

$$K_{\text{кач2}} \approx 1,$$

где  $K_{\text{кач1}}$  (коэффициент качества 1) характеризует ситуацию изготовления партии деталей без применения интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами в случае обнаружения дефектных деталей, его значение равно 0,75,  $K_{\text{кач2}}$  (коэффициент качества 2), значение которого стремится к 1, характеризует применение интегрированной автоматизированной системы также в случае обнаружения дефектных деталей в партии.

Как видно из полученного значения, для формулы  $K_{\text{кач1}}$  оставшееся значение 0,25 представляет собой дефектную продукцию, которая подлежит исправлению. Таким образом, при внедрении высокоточного измерительного оборудования (на примере КИМ) после особо ответственной технологической операции коэффициент качества оставшейся партии деталей стремится к 1. Для того, чтобы коэффициент качества всей партии на интервале планирования также стремился к 1, необходимо путем устранения дефектных деталей своевременно компенсировать дефицит годной продукции с помощью корректировки производственного расписания. В таком случае количество дефектных деталей на интервале планирования стремится к нулю, следовательно, повышается качество выпускаемых деталей, согласно формуле  $K_{\text{кач2}}$ .

Таким образом, при внедрении интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами предоставляется возможность повысить значение множителя коэффициента качества, входящего в состав показателя общей эффективности оборудования. В среднем достигается увеличение данного показателя на 15 – 20%, что создает предпосылки для повышения конкурентоспособности предприятия, а также позволяет сократить временные затраты на изготовление партии деталей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполненные исследования и практическая работа позволили получить следующие выводы и результаты:

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, позволяющие повысить эффективность управления технологического процесса изготовления годной продукции мелкосерийного производства путем использования интегрированной автоматизированной системы, позволяющей обнаружить дефектные детали после особо ответственной технологической операции и произвести коррекцию производственного расписания.

2. Выявлена связь между характеристиками контроля деталей после особо ответственной технологической операции и корректировкой производственного расписания.

3. На основе выявленной связи установлена зависимость между своевременной компенсацией дефицита годной продукции и увеличением значения коэффициента качества.

4. На основании выявленной зависимости между своевременной компенсацией дефицита продукции и коррекцией текущего производственного расписания разработана модель информационных потоков интегрированной автоматизированной системы управления производственными процессами, применимая для мелкосерийного типа производства при последовательном способе организации движения деталей, позволяющая описать процесс изготовления партии деталей. Данная модель позволяет представить процесс изготовления деталей с использованием системы автоматизированного проектирования технологических процессов, системы управления производственными заказами и высокоточного измерительного оборудования, которая своевременно позволяет выявить дефектные детали после особо ответственной технологической операции и, тем самым, изготовить их необходимое количество согласно требованиям, установленным в нормативно-технической документации (заявки заказчика).

5. На основе разработанной модели построен алгоритм управления производственным процессом при выявлении дефектных деталей в мелкосерийном производстве при последовательном способе организации движения деталей, позволяющий выявить взаимосвязи и последовательности операций рассматриваемого процесса.

6. Предложена интегрированная автоматизированная система управления производственными процессами, позволяющая корректировать производственное расписание в условиях мелкосерийного производства с целью получения годной продукции согласно нормативно-технической документации на основе перерасчета производственного расписания при помощи автоматизированной системы. Данная система использует информацию от высокоточного измерительного оборудования и данные о технологическом процессе, полученные от САПР ТП, составляет производственное расписание

таким образом, что позволит выполнить производственный заказ в установленный срок.

7. Решения, предложенные в интегрированной автоматизированной системе управления производственными процессами, позволяющие корректировать производственное расписание в условиях мелкосерийного производства с целью получения годной продукции согласно нормативно-технической документации на основе перерасчета производственного расписания позволило оценить эффективность ее внедрения с помощью раскрытия коэффициента качества, входящего в состав показателя общей эффективности оборудования (его увеличение в среднем составляет 15—20%), что подтверждается справкой об использовании результатов диссертационного исследования в АО «ЦНИИАГ».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. Шутиков, М. А. Применение MES-систем для контроля геометрических параметров подшипников. / М. А. Шутиков, К. С. Пономарев // Вестник МГТУ СТАНКИН – 2018. – № 4 (47). – С. 119-121.

2. Пономарев, К. С. Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия / К. С. Пономарев, М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ Станкин. – 2019. – № 4(51). – С. 19-23.

3. Шутиков, М. А. Повышение эффективности работы ОТК на основе интеграции базы данных результатов контроля с системами оперативного планирования категории MES / А. Н. Феофанов, Е. Б. Фролов, В. В. Крюков, М. А. Шутиков // Технология машиностроения. – 2020. – № 12. – С. 61-64.

4. Шутиков, М.А. Повышение эффективности выпуска годной продукции путем внедрения в технологический процесс координатно-измерительной машины после ответственной операции с дальнейшей загрузкой в mes-систему/ М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов, Е. Б. Фролов // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 4(59). – С. 41-43.

5. Шутиков, М. А. Влияние показателя общей эффективности оборудования на контроль деталей после особо ответственной технологической операции с дальнейшим планированием производственного расписания на предприятиях мелкосерийного типа производства / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 1(64). – С. 22-25.

### **Статьи в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science:**

1. Digital technologies in questions of automated manufacturing management systems. Michail Shutikov, Kirill Ponomarev, Alexander Feofanov, Tat'jana Grishina. MATEC Web Conf. 224 02104 (2018) DOI: 10.1051/mateconf/201822402104

2. Shutikov, M. A. Introducing a quality factor into the MES system when calculating machinery production schedule together with measuring equipment / M. A. Shutikov, A. N. Feofanov, K. S. Ponomarev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Сер. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07-11 сентября 2020 года. – BRISTOL, ENGLAND, 2020. – P. 042079. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042079.

**Прочие публикации:**

1. Феофанов, А. Н. Планирование загрузки измерительного оборудования совместно со станочным парком при помощи MES-системы / А. Н. Феофанов, М. А. Шутиков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 2(4). – С. 43-48.

2. Феофанов, А. Н. Разработка производственных исполнительных систем в условиях цифрового производства / А. Н. Феофанов, М. А. Шутиков, К. С. Пономарев // Вестник машиностроения. – 2018. – № 9. – С. 25-29.

3. Шутиков, М. А. MES-система как инструмент автоматизированного планирования производственного расписания при изготовлении и контроле продукции в современных условиях Индустрии 4.0 / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 2019. С. 175-179.

4. Шутиков, М. А. MES – системы как инструмент оптимизации загрузки контрольно-измерительного оборудования предприятия/ М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов. // Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники: сборник трудов II международной молодёжной конференции. - 2018. С. 315-318.

5. Шутиков, М. А. Использование измерительного оборудования в комплексе с MES-системой при контроле параметров изделия / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов / Наука сегодня: опыт, традиции, инновации: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 29 июля 2020 г. – Вологда: ООО «Маркер», 2020. С. 21-23.

6. Шутиков, М. А. Применение MES-систем в контексте обмена информацией между производственными участками и отделами контроля продукции на предприятии / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов / В сборнике: Пром-Инжиниринг. труды V Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. С. 314-318.

7. Шутиков, М. А. Применение MES-системы на этапах жизненного цикла изделия при изготовлении и контроле на предприятии / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина // Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал: Материалы II всероссийской научно-практической конференции, Вологда, 20 декабря 2019 года. – Вологда: Общество с ограниченной ответственностью "Маркер", 2019. – С. 82-83.

8. Шутиков, М. А. Внедрение системы автоматизированного расчета производственного расписания измерительного оборудования совместно со станочным парком / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник современных технологий. – 2019. – № 3(15). – С. 36-40.

**Учебное пособие:**

1. Феофанов, А. Н. Составление производственного расписания в системе MES в программной среде «Фобос»: Учебное пособие / А. Н. Феофанов, М. А. Шутиков, Е. Б. Фролов. – М.: Издательский центр ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 2008. – 79 с.