

На правах рукописи



СКОРНЯКОВА Елизавета Алексеевна

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.02.22 – Организация производства
(радиоэлектроника и приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидат технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель:

Сулаберидзе Владимир Шалвович,
д.т.н., старший научный сотрудник,
профессор кафедры метрологического
обеспечения инновационных технологий
и промышленной безопасности ФГАОУ
ВО ГУАП, академик Метрологической
академии Российской Федерации

Официальные оппоненты:

Богданов Александр Евгеньевич,
д.т.н., руководитель направления по
научно- исследовательской работе АО
«Галактика Центр»
Калачева Елена Александровна,
к.т.н., доцент кафедры «Метрология и
стандартизация» ФГБОУ ВО «МИРЭА -
Российский технологический
университет»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных
технологий, механики и оптики»
197101, Санкт-Петербург, пр.
Кронверкский, д. 49

Защита состоится «13» июня 2019 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт – Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А.

С текстами автореферата и диссертации можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт – Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «22» апреля 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04,
доктор технических наук, профессор

Ястребов А.П.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно директивным документам Правительства Российской Федерации: «Прогноз научно-технологического развития РФ: 2030», утвержденный Правительством РФ 3 января 2014 года; Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»; Указ от 7 мая 2018 года №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», а также приказ Минпромторга России от 20 июня 2017 года № 1907 «Об утверждении Рекомендаций по применению принципов бережливого производства в различных отраслях промышленности» – создание и внедрение автоматизированных производственных систем, нацеленных на сокращение времени производственных процессов и использующих в своем арсенале инструменты бережливого производства, является одним из приоритетных направлений технологического развития страны.

Перед современными приборостроительными предприятиями стоит ряд проблем, связанных с постоянно растущей сложностью продукции и повышением технических требований к производствам. Методами решения таких проблем являются внедрение новых информационных технологий и модернизация производственного оборудования, а также внедрение новых методов организации производства. При этом резко возрастает потребность в автоматизированных системах (АС), позволяющих сократить время осуществления процессов и повысить их результативность.

Повышение темпов роста экономики, создание и применение на отечественных предприятиях интегрированных производственных систем, позволяющих существенно увеличить результативность и производительность, сократить сроки на подготовку производства, разработку и освоение новой продукции, а также достигнуть требуемого уровня качества при меньших затратах, все это обуславливает потребность в более широком и интенсивном применении современных методов планирования и внедрения принципов бережливого производства в приборостроении.

Отдельно следует отметить, что основным тенденциями развития отечественной промышленности стал переход к поточному методу организации производства, характеризующегося определенным тактом выполнения каждого процесса и, как следствие, требующим создания новых средств автоматизации.

Планирование является одним из важнейших процессов, от которого зависит эффективность деятельности предприятия. Результативность процесса планирования напрямую влияет на качество изготавливаемой продукции и получаемую прибыль. Поэтому основным направлением повышения результативности организации процессов предприятия является разработка и внедрение автоматизированных систем управления.

Предлагаемые сегодня на рынке автоматизированные системы планирования класса MRP II, ERP, MES, APS не полностью соответствуют требованиям приборостроительных предприятий по ряду причин, главными из которых являются высокая стоимость таких систем, в том числе необходимость покупки постоянных обновлений, а также дополнительных модулей системы при запуске в производство новой продукции, отсутствие инструментов бережливого производства в основе системы, специфика используемой на предприятиях информации и методов организации производства, а также отсутствие возможности создания плана с «плавающим» горизонтом и возможности оперативного создания нескольких вариантов планов по различным критериям, которые являются стратегически важными элементами системы управления предприятиями. Именно эти обстоятельства дают основание считать разработку автоматизированной системы производственного планирования актуальной задачей для предприятий радиоэлектроники и приборостроения.

Степень научной разработанности темы. Вопросам организации производства и планирования производственных процессов посвящены труды таких исследователей, как

Р. Акофф, А. Файоль, Г. Форд, М.Х. Мескон, Я. Монден, Ф. Тейлор, Г. Эмерсон, М. Хедоури, И. Ансофф, О.Е. Ерманский, Л.В. Канторович, О.С. Виханский, Г.Б. Клейнер и др.

Отдельно стоит отметить исследователей, внесших значительный вклад в создание инструментов и методов «бережливого производства»: Г. Тагути, К. Исикава, У. Шухарт, Э. Деминг, Дж. Лайкер, Д. Майер, В. Парето, М. Кеннеди и др.

Основы организационно-технических систем управления предприятием были разработаны следующими зарубежными учеными: Т. Воллман, Р. Гудфеллоу, Н. Гайвер, Р. Канет, Дж. Койл, Ф. Дж. Орлицки, Дж. Плоссл, Д. О'Лири, О. Уайт, из отечественных ученых можно выделить Д.А. Гаврилова, Б.Н. Гайфуллина, И.А. Обухова и др.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных вопросам организации производств и разработке автоматизированных систем планирования, следует отметить, что в них не отражены в достаточной мере проблемы автоматизации процесса планирования поточного приборостроительного производства с целью оперативного создания планов с плавающим горизонтом на основе расчета времени такта. Поиск средств сокращения времени процесса производственного планирования, разработка моделей этого процесса, позволяющих повысить его результативность, а также разработка методик создания планов на основе расчета времени такта и составили основу постановки цели и задач диссертации.

Целью диссертационной работы является повышение результативности организации приборостроительного предприятия путем разработки моделей и методик планирования производственных процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ организации поточного производства приборостроительного предприятия, выявить особенности процесса планирования и сформулировать критерии его результативности;

2. Разработать модель организации процесса планирования с целью обеспечения оперативного взаимодействия подразделений предприятия и повышения результативности;

3. Разработать методику и модель построения планов различного горизонта, учитывающих специфику организации поточного производства приборостроительного предприятия;

4. Разработать методику расчета времени такта, позволяющую достигать наименьшей разницы между планом и заказом при учете различных ограничений;

5. Реализовать разработанные модели и методики в виде автоматизированной системы производственного планирования поточного производства и провести экспериментальное исследование и оценку результатов ее использования.

Объектом исследования является процесс планирования производственных процессов приборостроительного предприятия.

Предметом исследования являются модели и методики, позволяющие повысить результативность процесса планирования приборостроительного предприятия.

Теоретической и методологической базой исследования послужили научные труды зарубежных и отечественных ученых в области организации производства, теории производственного планирования, научные разработки в области автоматизации производственных процессов.

Методами исследования при решении поставленных задач являются методы математического моделирования, логического и сравнительного анализа, визуализации информации, бережливого производства, оценки рисков.

Информационной основой исследовательской работы являются научно-методические, научно-исследовательские материалы институтов и организаций, образовательных учреждений, научных и периодических изданий.

Область исследования соответствует пункту 3 «Разработка методов и средств информатизации и компьютеризации производственных процессов, их документального обеспечения на всех стадиях», пункту 4 «Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов», пункту 9 «Разработка методов и средств организации производства в условиях технических и экономических рисков» и пункту 11 «Разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами» паспорта специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям).

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Модель организации процесса планирования, позволяющая упорядочить процесс документооборота и взаимодействия участников за счет выделения устойчивого подмножества с целью повышения результативности исследуемого процесса;
2. Методика и модель построения планов производства различного горизонта, учитывающие ограничения и специфику организации поточного производства приборостроительного предприятия;
3. Методика расчета времени такта, позволяющая достигать минимальной разницы плана и заказа при учете различных ограничений;
4. Автоматизированная система производственного планирования приборостроительного предприятия поточного типа, позволяющая повысить результативность исследуемого процесса.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана модель организации процесса планирования приборостроительного предприятия, позволяющая осуществлять взаимодействие всех участников внутри одного устойчивого подмножества в режиме реального времени с целью повышения результативности процесса производственного планирования;
2. Предложены многокритериальная модель и методика процесса создания производственного плана приборостроительного предприятия поточного типа, позволяющие создавать план любого горизонта с учетом большого количества входных данных;
3. Разработана методика расчета оптимального времени такта при учете различных ограничений, обеспечивающая наибольшее соответствие объема производства заказу для планов любой длительности, не имеющая аналогов;
4. Создана новая автоматизированная система производственного планирования на основе разработанных моделей и методик, повышающая результативность исследуемого процесса.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке моделей и методик планирования приборостроительного предприятия поточного типа на основе инструментов, ранее применяемых в различных областях науки.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработанная модель организации процесса планирования позволила упорядочить обмен информацией между подразделениями и цехами предприятия, при большом количестве которых анализ связей затрудняется и превращается в хаос, а также позволила получить наглядную информацию о потоках данных и уровнях значимости документов;
2. Предложенные модель и методики построения плана и расчета оптимального времени такта могут быть применены не только в приборостроении, но и в автомобилестроении, машиностроении и других областях;
3. Формирование версий производственного плана в автоматизированной системе на основе оперативно внесенной информации и их оценка в режиме реального масштаба времени позволяют значительно повысить результативность процесса планирования;
4. Автоматизированная система позволяет хранить всю необходимую информацию в одной базе данных, осуществлять планирование как по месяцам, так и по

производственным периодам, учитывать различные критерии создания плана, сохранять историю версий производственного плана и их оценки с целью учета при формировании будущих планов.

Достоверность научных результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применения методов и принципов «бережливого производства», использованием современных средств проведения экспериментов, учетом современных научных достижений в области производственного планирования и в области применения инструментов «бережливого производства», а также положительными результатами экспериментов построения плана в автоматизированной системе, обсуждением результатов исследований на научно-практических конференциях, а также их публикацией в ведущих научных рецензируемых изданиях.

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационного исследования в виде основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, внедрены в деятельность АО «Лазерные системы», АО «НПП «Сигнал», АО «Северный пресс» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждается соответствующими актами.

Апробация результатов работы. Результаты исследования были представлены на IX Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (Санкт-Петербург, 16 ноября 2016 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука и АСУ- 2018» (Москва, 30 октября 2018 г.), XI Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (Санкт-Петербург, 15 ноября 2018 г.), Международном семинаре «Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» (Красноярск, 04-06 апреля 2019 г.) и Международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (Санкт-Петербург, 4 марта 2019 г.).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 17 научных работ (в том числе 5 без соавторов), включая 6 работ в рецензируемых научных изданиях ВАК и 2 статьи в журнале, индексируемом международными базами Web of Science и Scopus, получены свидетельства о регистрации базы данных и программы для ЭВМ.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы из 103 наименований и 2 приложений. Текст диссертации изложен на 124 страницах, содержит 55 рисунков и 16 таблиц, общий объем с учетом приложений составляет 140 страниц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна, а также определена практическая значимость полученных результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Анализ организации планирования производственных процессов приборостроительного предприятия» проанализированы современные тенденции организации производственных процессов и внедрения автоматизированных систем планирования, проведен структурный анализ организации процесса производственного планирования на примере приборостроительных предприятий АО «Лазерные системы» и АО «Северный пресс», а также автомобилестроительного предприятия Филиала ООО «Тойота Мотор» в Санкт-Петербурге с целью более глубокого анализа процесса. Проанализированы особенности организации процесса планирования поточного производства на основе принципов «бережливого производства» и сформулированы показатели результативности процесса производственного планирования, а также проведена идентификация и оценка рисков исследуемого процесса.

Проведенный структурный анализ (рисунки 1-3) позволил определить «узкое место» процесса производственного планирования, которым является узел A2, включающий сбор исходных данных, создание плана и его версий, а также оценку версий вовлеченными подразделениями. Определена необходимость стандартизации и автоматизации выявленного «узкого места».

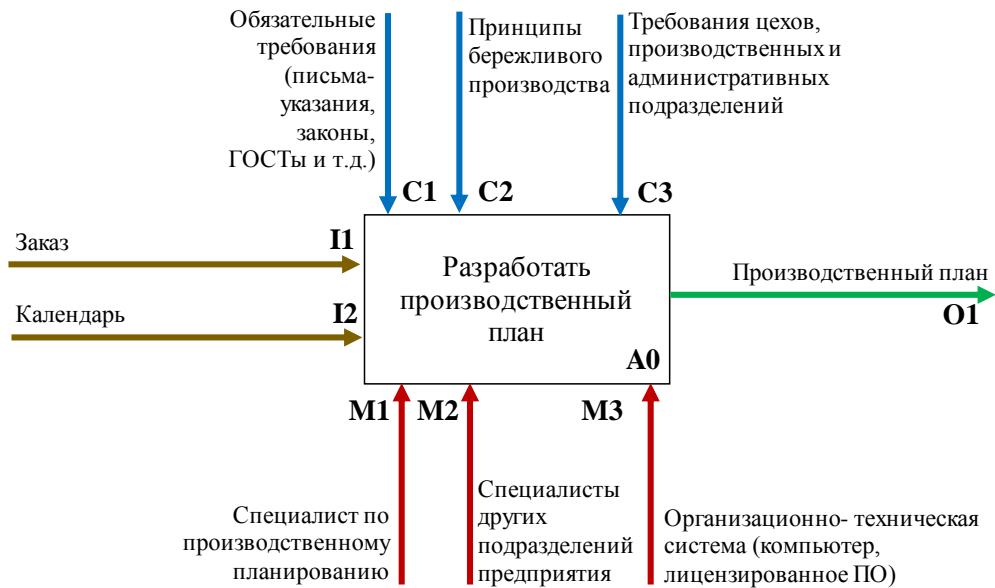


Рисунок 1 - Контекстная диаграмма процесса производственного планирования

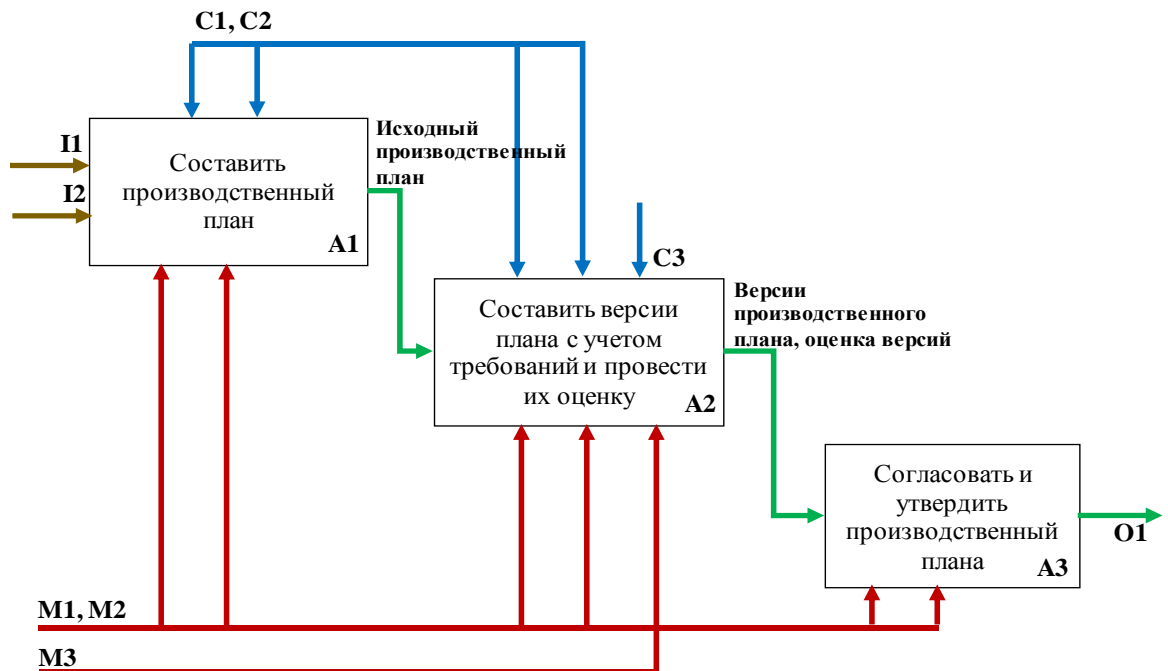


Рисунок 2 - Декомпозиция контекстной диаграммы (A0)

При осуществлении процесса планирования приборостроительного предприятия возникает необходимость сбора и учета разнообразной информации. При отсутствии автоматизированной системы вся информация хранится в бумажных или электронных документах различных форматов. На сбор и обработку требуемых для процесса данных у специалиста отдела производственного планирования затрачивается от одного дня до двух недель, так как вся информация после сбора должна быть приведена в стандартный формат и согласована с руководителями цехов и подразделений. В процессе ежемесячного планирования на процесс сбора и обработки информации отводится не более дня, что говорит о необходимости совершенствования данного процесса. Для решения описанной проблемы автором предложена автоматизированная система, включающая сбор

информации в стандартном формате, ее подтверждение в электронном виде руководителями подразделений и учет этой информации для дальнейшего построения версий производственного плана. Это позволит оперативно собирать информацию, визуализировать ее в стандартном формате, а также отслеживать достоверность предоставленной информации по средствам подтверждения отдельными руководителями.

Следующим этапом является непосредственное создание производственного плана и его версий в случае значительных изменений заказа. На создание плана в электронном документе формата Excel специалистом отдела производственного планирования затрачивается от 30 минут до 2-3 часов, в зависимости от изменений, которые необходимо внести. При создании большого числа версий этот процесс может растягиваться на несколько дней. Значительную роль играет сложность вносимых изменений и скорость обработки большого массива данных в Excel. Так как план составляется на несколько месяцев вперед или на несколько лет для каждого рабочего дня, он должен учитывать определенные критерии построения плана (визуализация несоответствия данным критериям отслеживается при помощи условного форматирования, значительно снижающего скорость работы файла) и должен быть построен максимально быстро, то с целью повышения результативности данного процесса он также должен быть переведен в автоматизированную среду.

Помимо создания версий плана значительным этапом в ежемесячном планировании является оценка этих версий вовлеченными подразделениями. Оценка нескольких версий может занимать от 10 минут до нескольких дней в зависимости от уровня изменений плана. Критерии оценивания и формат оценок у каждого подразделения различны и нуждаются в стандартизации с целью снижения времени на обработку информации.

Из приведенной на рисунке 3 диаграммы Ганта, описывающей текущий процесс производственного планирования, видно, что любая задержка в одном из рассмотренных этапов создания плана приводит к сбоям в цепочке всех последующих, связанных с ним процессов промышленного предприятия.

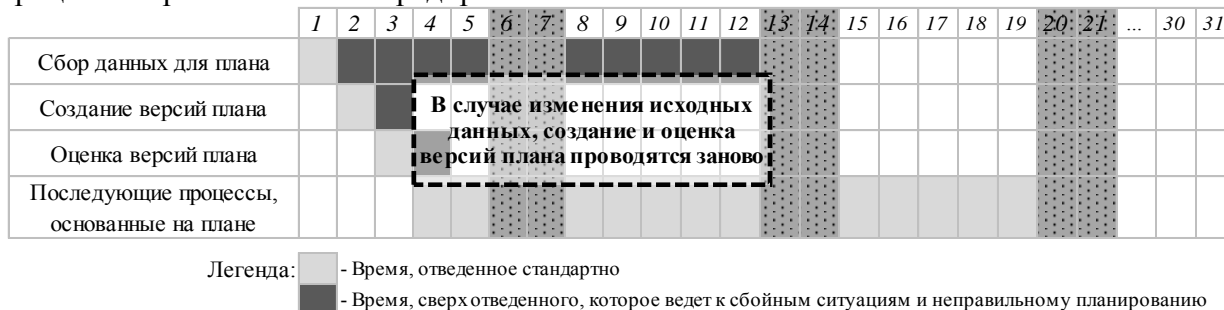


Рисунок 3 – Процесс ежемесячного планирования

Для повышения результативности процесса планирования и его постоянного улучшения, а также поддержания стабильного качества производимой приборостроительной продукции, обязательно должны быть использованы принципы и инструменты «бережливого производства» (рис.4). Для стандартизации и постоянного улучшения процесс планирования должен осуществляться по принципу PDCA (Plan-Do-Check-Act) (рис. 5). Помимо цикла PDCA, также должны использоваться такие инструменты, как: защита от непреднамеренных ошибок (Poka- Yoke, PY) – автоматизированная система планирования по сути является частным случаем PY, стандартизация работы – создание плана на основе времени цикла (cycle time, ВЦ) и рассчитанного времени такта (takt time, ВТ), визуализация (visualization), обсуждение и обмен информацией (Nemawashi), постоянное улучшение (Kaizen).



Рисунок 4 – Принципы и инструменты бережливого производства в производственном планировании

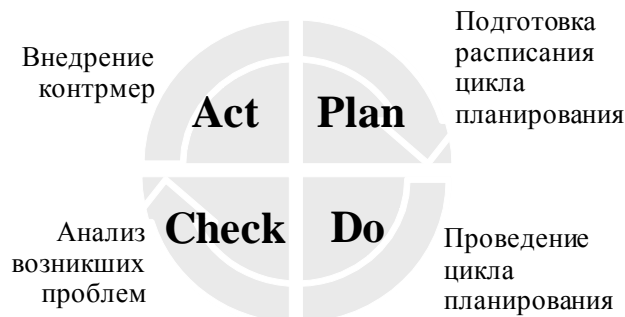


Рисунок 5 – Цикл PDCA процесса производственного планирования

Для оценки результативности процесса производственного планирования были сформулированы качественные и количественные показатели и критерии их оценивания (таблица 1).

Показатель результативности	Критерий		
	Не требуются улучшения, корректирующие/предупреждающие действия	Требуются предупреждающие действия	Требуются корректирующие действия
Время создания исходного календаря / формирования общего календаря / создания плана	<1 минуты	1-30 минут	>30 минут
Количество ошибок при создании исходного календаря / в статусах дней/ графике смен / при внесении плановых остановок / при формировании общего календаря / в созданном плане	0	>0	
Время внесения статусов дней и графика смен / внесения плановых остановок производства	<10 минут	10-30 минут	>30 минут
Время получения и сопоставления ограничений производства / время оценки плана	<4 часов	4-8 часов	>8 часов
Для построения плана использован общий календарь	Да	Нет	
ВТ соответствует ограничениям	Да	Нет	
Ежедневный объем рассчитывает корректно / не превышает ограничения	Да	Нет	
К _{оп} соответствует ограничениям	Да	Нет	
Ежемесячная разница/ разница по периодам / кумулятивная разница между планом производства и заказом минимальна	Да	Нет	
Построенный план соответствует условиям, заданным специалистом по планированию	Да	Нет	

Также была проведена идентификация и оценка рисков экспертным методом и методом FMEA. По результатам проделанной оценки к наиболее критичным рискам отнесены риски, связанные с возможными ошибками и предоставлением некорректных данных. Благодаря проделанному анализу выявлены риски, для которых в первую очередь должны быть разработаны корректирующие или предупреждающие мероприятия.

По результатам проведенного анализа выявлено, что для повышения результативности исследуемого процесса в автоматизированную среду должны быть переведены три подпроцесса производственного планирования: сбор исходных данных, создание плана и его версий, а также оценка созданных версий вовлеченными подразделениями.

Во втором разделе «Разработка моделей и методик планирования приборостроительного предприятия» предложены модель организации процесса производственного планирования, модель и методика построения плана любого горизонта, методика расчета времени такта поточного приборостроительного предприятия.

В качестве математической модели использована теория графов. Процесс производственного планирования осуществляется на основе взаимодействия его элементов:

$$E = \{V_1, V_2, \dots, V_i\}, \tag{1}$$

где V_1, V_2, \dots, V_i – вершины графа, представляющие участников процесса производственного планирования.

Взаимодействие подразделений и цехов в процессе производственного планирования в виде информационных связей опишем через отображение Γ , которое в сочетании с множеством E образует граф (рис. 6):

$$G = (E, \Gamma), \tag{2}$$

где E - множество рассматриваемых элементов, Γ – множество информационных связей между участниками рассматриваемого процесса.

С целью упорядочения взаимодействия участников процесса (V_1, V_2, \dots, V_i) применен метод разложения графа на максимально связанные подграфы (метод Мальгранжа). Использование данного метода позволило осуществлять стандартизированный обмен данными внутри любого независимого подграфа (рис. 7).

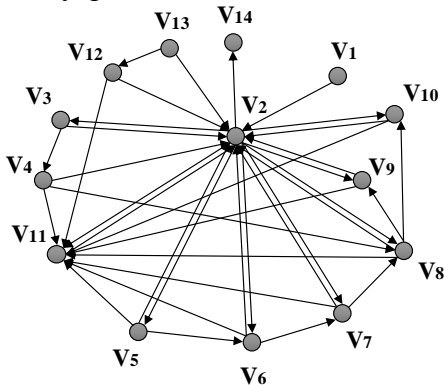


Рисунок 6 – Граф, отображающий взаимодействие участников процесса производственного планирования

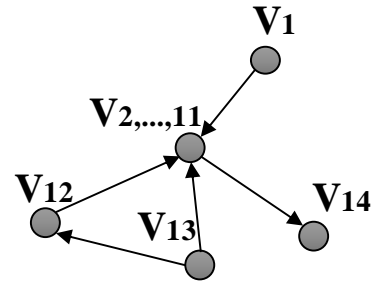


Рисунок 7 – Граф, преобразованный методом Мальгранжа

Пусть в результате применения метода Мальгранжа получен ациклический граф G :

$$G = (E, \hat{\Gamma}^-), \tag{3}$$

где E - множество рассматриваемых элементов (вершин графа), $\hat{\Gamma}^-$ – обратное отображение графа.

Проведена дальнейшая топологическая сортировка графа с использованием матрицы смежности (рис.8). Последовательные значения, соответствующие итерациям алгоритма приведены на рисунке 9, при этом прочерки соответствуют вершинам, не принадлежащим множеству ("замаскированные" вершины) на соответствующем этапе алгоритма.

	V ₁	V _{2...11}	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄
V ₁		1			
V _{2...11}					1
V ₁₂		1			
V ₁₃		1	1		
V ₁₄					

Рисунок 8 - Матрица смежности вершин

V ₁	V _{2...11}	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄	
0	3	1	0	1	L ₀ ={V ₁ , V ₁₃ }
-	2	0	-	0	L ₁ ={V ₁₂ , V ₁₄ }
-	1	-	-	-	L ₂ ={V _{2...11} }

Рисунок 9 - Последовательность итерации алгоритма Демукрона

Граф, разделенный на уровни значимости по методу Демукрона приведен на рисунке 10.

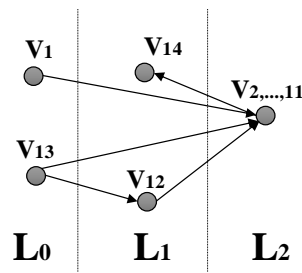


Рисунок 10 - Граф, разделенный по уровням значимости

Преобразованный граф использован в качестве основы для автоматизированной системы производственного планирования. Основное преимущество данной модели заключается в осуществлении взаимодействия внутри одного устойчивого подмножества в режиме реального времени, что является основополагающим при повышении результативности процесса производственного планирования.

Основной отличительной особенностью поточного производства является согласованность норм времени всех операций производства, организованного в виде потока. Для эффективного производства на поточных предприятиях все работы должны быть стандартизованы, а значит каждое действие должно иметь точное описание, включающее время такта, время цикла, последовательность выполнения определенных задач, минимальное количество запасов для выполнения работы. Учитывая сказанное выше, объем производства можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\Pi} = \frac{t_{\text{досм. раб.}}}{BT} \cdot K_{\text{оп}}, \quad (4)$$

где Q_{Π} - количество произведенных продуктов, $t_{\text{досм. раб.}}$ - доступное для производства время, BT - время такта, $K_{\text{оп}}$ - коэффициент операционной производительности.

$K_{\text{оп}}$ позволяет закладывать в план риски, связанные с внеплановыми остановками по причине возможных дефектов, внедрением в производство различных проектов, производством тестовых партий продуктов, тестированием нового оборудования и т.д. При создании плана, все вовлеченные подразделения при необходимости могут задать свою цель по $K_{\text{оп}}$ с обязательным указанием причины. В таком случае при построении плана используется минимальный $K_{\text{оп}}$ ($K_{\text{оп min}}$) для каждой смены - минимальное значение из всех указанных.

В идеальном случае объем производства должен полностью соответствовать заказу на производство, то есть продукция должна поставляться точно в срок, но практически всегда это условие не соблюдается ввиду стремления производителя максимально использовать свои ресурсы, поэтому введен следующий критерий построения плана:

$$\begin{cases} \Delta = Q_{\Pi} - Q_3 \\ \Delta \rightarrow \min \end{cases}, \quad (5)$$

где Q_3 - количество заказанной продукции.

Ограничения объемов производства каждого продукта, задается участниками процесса планирования, и имеет следующий вид:

$$x_i \leq x_{i \text{ max}}, \quad (6)$$

где x - количество продуктов, i - вид продукта ($i \in 1, \dots, n$).

Для i -го вида продуктов и j -го количества смен система ограничений плана имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{доц.раб.}j} = t_{\text{общ}j} - t_{\text{пл.ост.}j} \\ VT_j \geq BC_{\text{max}j} \\ T_c \geq T_{\text{смены}} \\ K_{\text{ОП}j} = K_{\text{ОП} \text{min}j} \\ x_{i_j} \leq x_{i_{\text{max}j}} \end{array} \right. , \quad (7)$$

где $t_{\text{общ}}$ – общее рабочее время, $t_{\text{пл.ост}}$ – время плановых остановок, T_c – количество дней между двумя соседними переходами на новое ВТ, BC_{max} – самое долгое ВЦ (определяется самым «узким местом» производства), $T_{\text{смены}}$ – минимальное количество календарных дней с одним ВТ (задается вовлеченными в процесс планирования), $K_{\text{ОП} \text{min}}$ – минимальное значение коэффициента операционной производительности, x – количество продуктов, x – максимально возможное для производства количество продуктов, i – вид продукта ($i \in 1, \dots, n$).

При построении плана решается следующее неравенство:

$$\sum_{i=0}^n Q_{3i} \leq \sum_{j=0}^m K_{\text{ОП} \text{min}j} \cdot \frac{t_{\text{доц.раб.}j}}{VT_j}, \quad (8)$$

где i – количество продуктов, j – количество смен.

В случае, если данное неравенство не решается, то вводятся дополнительные рабочие смены:

$$\sum_{i=0}^n Q_{3i} \leq \left(\sum_{j=0}^m K_{\text{ОП} \text{min}j} \cdot \frac{t_{\text{доц.раб.}j}}{VT_j} + \sum_{k=0}^l K_{\text{ОП} \text{min}k} \cdot \frac{t_{\text{доц.раб.}k}}{VT_k} \right), \quad (9)$$

где k – количество дополнительных смен.

На рисунке 11 приведен граф, представляющий модель построения плана производства.

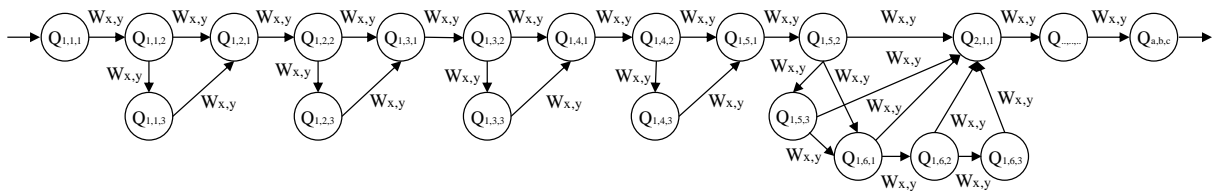


Рисунок 11 - Ориентированный граф построения производственного плана

Расчет оптимального ВТ является одной из главных задач производственного планирования поточного производства, так как позволяет привести план к максимальному соответствию главному критерию создаваемого плана (5). Разработана методика расчета ВТ, включающая два альтернативных алгоритма – алгоритм, рассчитывающий ВТ на фиксированные промежутки, равные $T_{\text{смены}}$ (А1), и алгоритм, рассчитывающий время такта для различных промежутков (А2), выбор алгоритма, который должен быть заложен в основу разработанной методики и автоматизированной системы, осуществлен на основе экспериментальных данных, приведенных в четвертом разделе диссертационной работы.

Сформулирована методика построения плана поточного производства, включающая следующие этапы: сбор исходных данных (рис. 12), внесение/ подгрузку заказа, выбор критериев построения плана, построение плана или его версий, оценку плана или его версий (рис. 13), представление плана (нескольких версий планов) на согласование, а также учитывающая инструменты «бережливого производства» – обязательный обмен

информацией и ее согласование (Nemawashi) на каждом из этапов сбора данных с целью исключения ошибок и недостоверной информации, а также элементы автоматизации (PY), нацеленные на предотвращение ошибок и их передачу на следующий этап процесса. Так как методика является самостоятельным результатом диссертационного исследования, она может быть применена без использования разработанной автоматизированной системы. Именно поэтому в представленные на рисунках 12 и 13 алгоритмы добавлены обозначения «PY» для тех операций, где чаще всего встречаются ошибки при создании производственного плана, и для которых обязательны средства автоматизации.

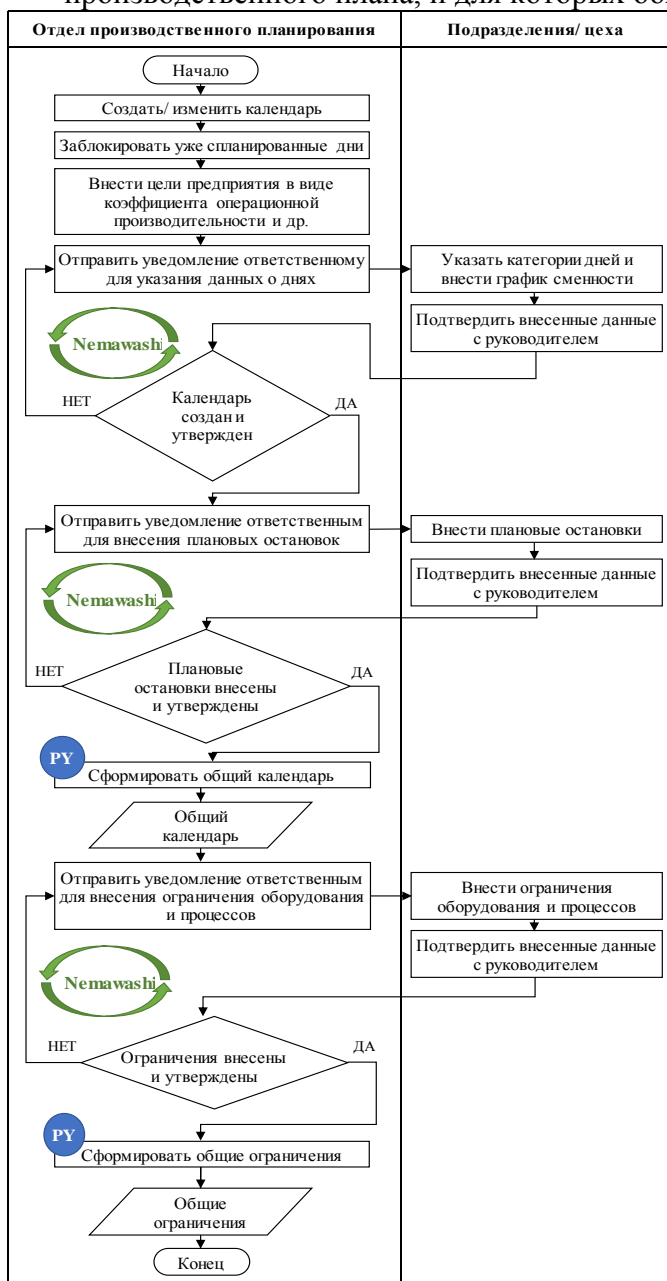


Рисунок 12 – Алгоритм сбора исходных данных для осуществления процесса производственного планирования

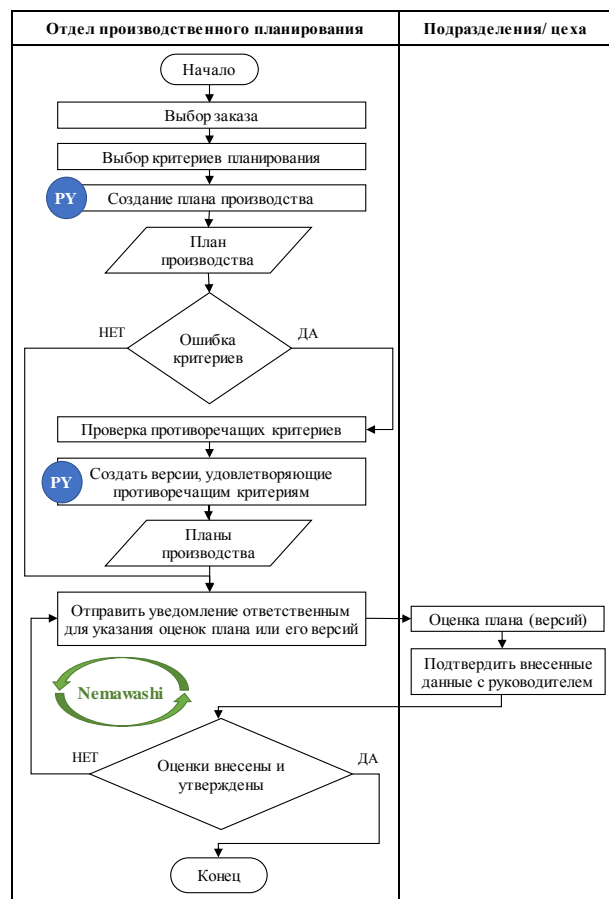


Рисунок 13 – Алгоритм создания и оценки плана

Результативность разработанных моделей и методик подтверждена экспериментальными данными, приведенными в четвертом разделе.

В третьем разделе «Разработка программного средства, реализующего описанные модели и методики» проведен выбор методологии создания АС планирования, описаны формирование структуры базы данных (БД) и разработка интерфейса системы, а также приведен порядок работы с разработанным программным продуктом.

Разработка АС проводилась согласно смешанному варианту – итеративная разработка с учетом технического задания, описывающего предметную область и проблематику решаемой задачи, а также вариант реализации интерфейса. Данный подход позволяет оперировать проблемно-ориентированным и личностно-ориентированным методами.

АС реализована в виде веб-сайта с целью обеспечения механизма кроссплатформенности. Таким образом исключается привязка системы к конкретному компьютеру и его программному обеспечению (ПО), что в перспективе упростит переход к свободному ПО и ПО, разработанному в нашей стране. Также такой вид реализации исключает необходимость обновления приложений на большом количестве компьютеров предприятия.

Формирование структуры БД проводилось на основе первоначально предложенной структуры, включающей 9 таблиц. В процессе проектирования на основе принятых моделей и методик процесса производственного планирования поточного производства, а также с учетом особенностей предметной области, были внесены изменения. В результате, была создана наиболее подходящая для исследуемого процесса и автоматизированной системы база данных, учитывающая всю необходимую информацию и состоящая из 25 таблиц. Ключевыми особенностями БД являются ключ типа INT в виде индекса, приведенного к числу вида YYYYMMDDhhmmss, а также алгоритмическое заполнение типовыми значениями исходного массива данных.

Разработка интерфейса учитывала риски влияния человеческого фактора при внесении данных. После первичной разработки интерфейса проведено его тестирование, показавшее необходимость снижения рисков. С этой целью использован метод Human Reliability Assessment (HRA), по результатам проведенного HRA предложены специальные средства валидации HTML и компоновочные решения. Результаты их применения приведены на рисунке 14.

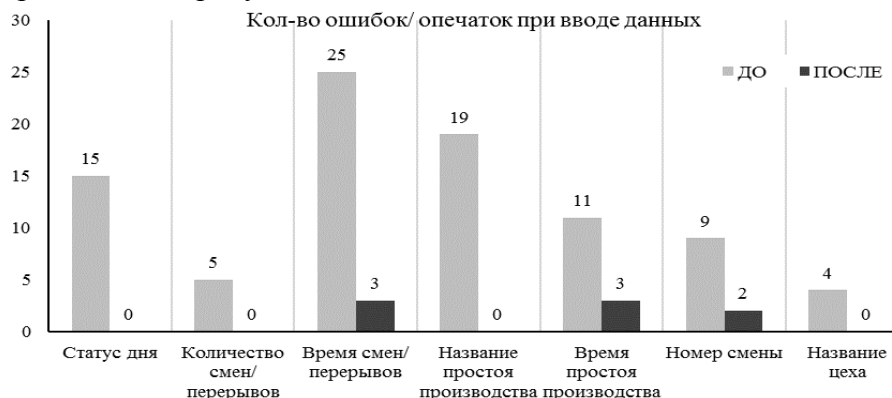


Рисунок 14 - Результаты тестирования

Предложенная АС позволила осуществлять процесс производственного планирования в единой информационной среде, хранить централизованно большой объем информации и позволяет получать необходимые данные при наличии доступа в интернет. Основные составные элементы разработанной системы зарегистрированы в виде программы для ЭВМ «Production Planner» и БД «Planner».

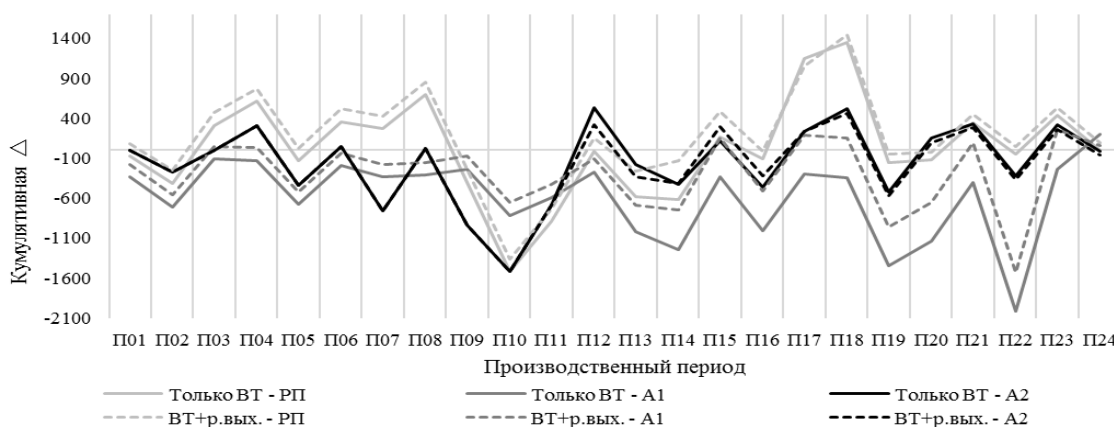
В четвертом разделе «Практическая реализация разработанного программного средства» проведен ряд экспериментов, позволивших выявить алгоритм расчета ВТ, обеспечивающего наименьшую разницу между планом и заказом, и использованный в качестве основы разработанной методики расчета оптимального времени такта, а также подтвердивших функциональные возможности разработанной АС. Проведена оценка результатов применения АС в процессе планирования нескольких приборостроительных предприятий.

С целью выявления алгоритма, который должен быть использован в качестве основы методики расчета оптимального ВТ, была проведена апробация результатов исследования в процессе производственного планирования. Построение планов было осуществлено для

заказа (31), учитывающего прогноз спроса на продукцию на 24 производственных периода, и заказа (32), характеризующегося значительно возросшим спросом в середине заказа. Выбор алгоритма был осуществлен на основе сравнения планов, полученных тремя вариантами построения: ручное построение плана (РП), алгоритм 1 (А1) и алгоритм 2 (А2). Выполнение заказов осуществлялось тремя путями: только ВТ, ВТ и возможные рабочие выходные (ВТ+р.вых.), ВТ, возможные рабочие выходные и введение дополнительной смены (ВТ+р.вых.+доп.см.).

Результаты экспериментов приведены на рисунке 15. Рисунок 15а отражает кумулятивное (накопительное) значение Δ планов, построенных для выполнения 31 двумя путями – только ВТ и ВТ+р.вых. Для 32 приведен только график (15б), отражающий кумулятивное значение Δ (кум. Δ) для плана, построенного с использованием ВТ+р.вых.+доп.см., так как 32 значительно превышает производственные мощности и кум. Δ планов, построенных другими путями, имеет слишком большой разброс значений и полученные графики не являются наглядными.

а)



б)

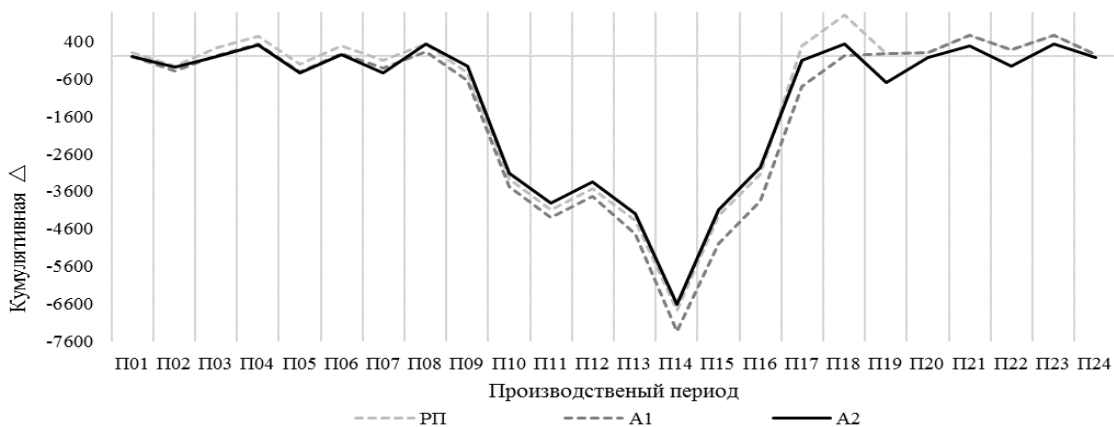


Рисунок 15 - Результаты экспериментов

Учитывая объемы заказа и ограничения $T_{\text{смены}}$ и $ВЦ_{\text{max}}$ можно сказать о том, что достижение нулевой Δ для каждого производственного периода невозможно. Поэтому выбор алгоритма осуществлялся исходя из количества периодов, в которых кум. Δ приближена к нулю (кум. $\Delta = \pm 50$), наименьшего значения кум. Δ , наибольшего значения кум. Δ . Учитывая проведенный анализ созданных планов, в основу методики расчета оптимального ВТ и АС системы производственного планирования был заложен алгоритм 2 (рис. 16).

Ряд экспериментов построения плана на основе заказов различных производств позволил оценить функциональность разработанной АС и подтвердить ее универсальность.

Осуществление процесса производственного планирования при помощи АС и оценка результативности этого процесса показали, что использование разработанного программного продукта позволяет улучшить все показатели результативности, а именно: сократить количество ошибок подпроцесса сбора данных на 85%, сократить время построения плана

до 1 минуты и полностью исключить ошибки процесса создания плана, сократить время подпроцесса оценки плана и его версий на 60%, а также позволило полностью соблюдать сроки исследуемых подпроцессов планирования.

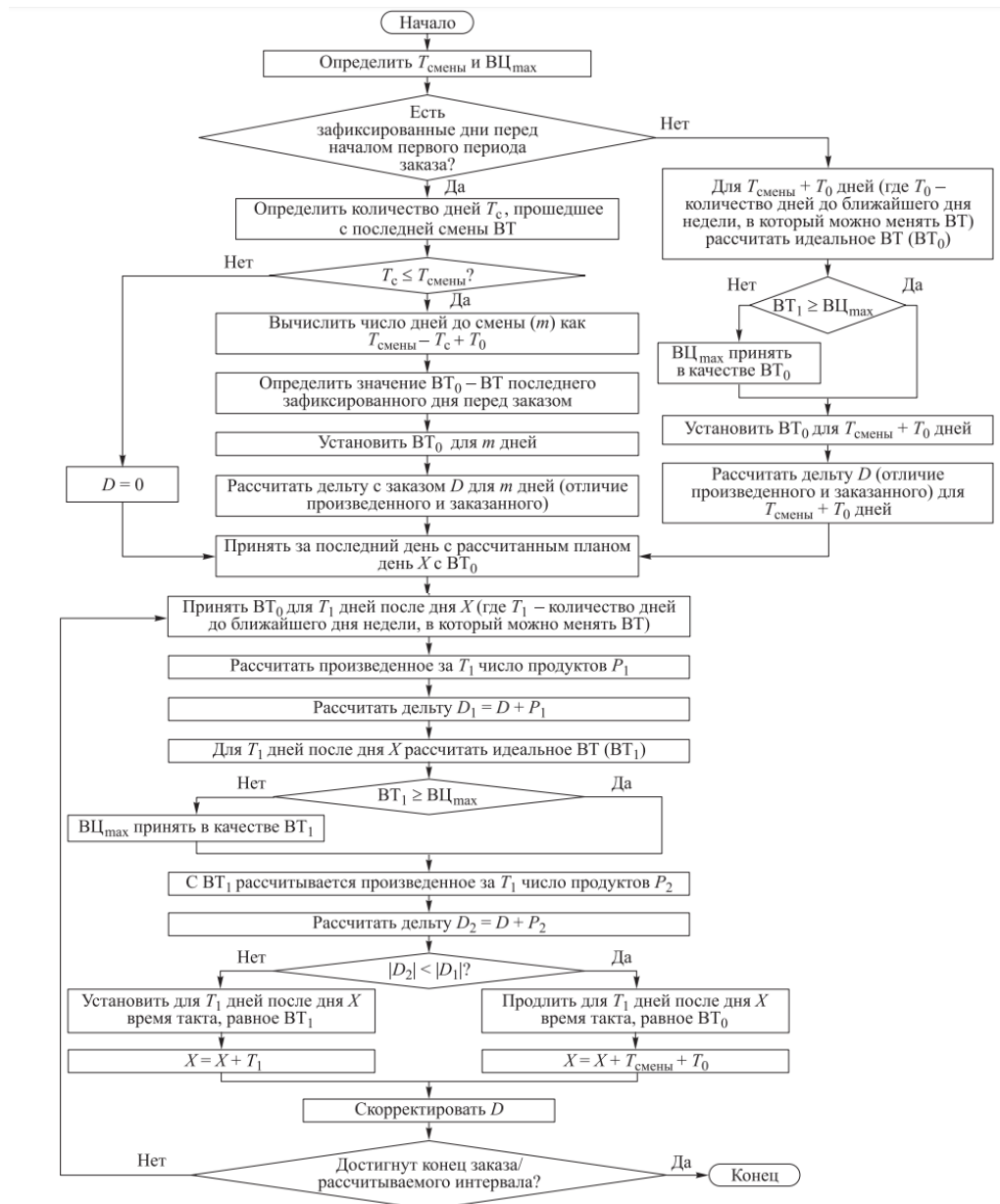


Рисунок 16 – Алгоритм расчета времени такта для различных промежутков

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненной диссертационной работы проведен комплекс исследований, направленных на повышение результативности организации приборостроительного предприятия путем разработки моделей и методик планирования производственных процессов.

В диссертационной работе получены **следующие результаты, имеющие научную новизну и практическое значение:**

- проведен анализ организации поточного производства приборостроительного предприятия, выявлены особенности процесса планирования и впервые сформулированы критерии результативности процесса производственного планирования поточного приборостроительного предприятия;

- разработана модель организации процесса планирования с целью обеспечения оперативного взаимодействия и документооборота подразделений предприятия и повышения результативности процесса производственного планирования;

- разработаны модель и методика построения планов различного горизонта, учитывающие специфику организации поточного производства приборостроительного предприятия, а также позволяющие создавать планы любого горизонта с посменной детализацией, для любого количества продуктов, а также с учетом коэффициента операционной производительности;

- разработана методика расчета времени такта, позволяющая достигать наименьшей разницы между планом и заказом при учете различных исходных данных;

- предложенные модели и методики реализованы в виде новой автоматизированной системы производственного планирования, основные элементы которой зарегистрированы (база данных «Planner» (регистрационный № 2019620209 от 04.02.2019) и программа для ЭВМ «Production Planner» (регистрационный № 2019612553 от 22.02.2019)), а также получены результаты практического использования системы в реальном процессе ежемесячного планирования, которые представлены в виде экспериментальных данных, подтверждающих универсальность разработанной системы и возможность ее использования для поточных производств с различным объемом выпуска.

Использование результатов диссертационного исследования обеспечивает повышение результативности процесса производственного планирования, выраженное в:

- полном соблюдении сроков подпроцессов планирования;
- минимизация рисков процесса планирования;
- сокращение ошибок подпроцесса сбора, обработки и учета данных для создания плана на 85%;
- сокращении времени подпроцесса создания плана производства с 30 минут до 1 минуты;
- полном исключении ошибок подпроцесса создания плана;
- сокращении времени оценки версий плана и обобщения оценок в среднем на 60%.

Повышение результативности производственного планирования позволило снизить производственные затраты на 5-10% за счет корректного учета производственных ограничений и затраты на хранение перепроизведенной продукции на 10-15% благодаря созданию плана, обеспечивающего производство заказа в установленный срок. Полученные результаты подтверждены актами внедрения.

Таким образом, в диссертационной работе достигнута поставленная цель повышения результативности организации производства путем разработки моделей и методик производственного планирования приборостроительного предприятия и решены поставленные научно-технические задачи.

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК

1. Скорнякова, Е.А. Модель системы оперативного реагирования при производственном планировании // Качество и жизнь. – 2018. – № 2. – С 39-41.
2. Скорнякова, Е.А. Проблемы принятия оперативных управленческих решений из-за отклонений в процессе производственного планирования высокопроизводительного предприятия / Е.А. Скорнякова, С.А. Бабаев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – №4. – С. 35-39.
3. Скорнякова, Е.А. Методы алгоритмизации планирования высокопроизводительного сборочного производства / Е.А. Скорнякова, В.М. Васюков, В.Ш. Сулаберидзе // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2018. – №4. – С. 15-22.

4. Скорнякова, Е.А. Повышение качества производственного плана за счет использования принципов «бережливого производства» // Качество и жизнь. – 2019. – № 1. – С. 39-40.
5. Скорнякова, Е.А. Особенности создания пользовательского интерфейса автоматизированной системы производственного планирования / Е.А. Скорнякова, В.М. Васюков, В.Ш. Сулаберидзе // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – 2019. – №1. – С. 52-56.
6. Скорнякова, Е.А. Идентификация и оценка рисков процесса планирования высокопроизводительного производства / Е.А. Скорнякова, В.Ш. Сулаберидзе, А.С. Борейшо, В.С. Лугиня // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – №4. – С. 108-114.

Статьи в научных журналах, индексируемых международными базами Web of Science и Scopus

7. Skorniakova E.A. Structural features of automated lean production planning system database. Skorniakova E.A., Vasyukov V.M., Sulaberidze V.S., Yastrebov A.P. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). №152026.
8. Skorniakova E.A. Mechanical properties of new functional composite materials based on polymeric binders. Sulaberidze V. Sh., Mushenko V.D., Mikheev V.A., Skorniakova E.A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). №151017.

Статьи в прочих изданиях и материалы конференций

9. Skornyakova E.A. Model of quick response production planning system. International Scientific Journal “Mathematical Modeling”, 2017. Pp.73-74.
10. Сесина, Е.А. Модель движения рисков при оперативном обмене информацией в процессе производственного планирования // Сборник трудов IX Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», том II. – Спб., 2017. – С. 154-155.
11. Сесина Е.А. Алгоритмизация процессов обработки разно размерных данных в едином информационном потоке // Сборник трудов IX Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», том II. – Спб., 2017. – С. 151-153.
12. Скорнякова, Е.А. Проблемы автоматизации процесса производственного планирования / Скорнякова Е.А., Сулаберидзе В.Ш. // Сборник Всероссийской научно-технической конференции «Наука и АСУ - 2018», 2018. – С. 67.
13. Скорнякова, Е.А. Балансировка процессов в масштабе реального времени за счет использования автоматизированной подсистемы / Скорнякова Е.А., Бабаев С.А. // Сборник трудов XI Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», том I. – Спб., 2018. – С. 132-136.
14. Скорнякова Е.А. Инструменты автоматизации контроля качества, встраиваемые в производственный процесс / Скорнякова Е.А., Бабаев С.А. // Сборник трудов XI Общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», том I. – Спб., 2018. – С. 136-139.
15. Скорнякова, Е.А. Разработка оптимального алгоритма создания плана производства на основе «бережливых» принципов / Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А. // Сборник Международного форума «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». – СПб.: ГУАП, 2019. – С. 220-221.

Список заявок на регистрацию интеллектуальной собственности

16. База данных «Planner» (регистрационный № 2019620209 от 04.02.2019).
17. Программа для ЭВМ «Production Planner» (регистрационный № 2019612553 от 22.02.2019).