

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт передовых производственных технологий

Работа допущена к защите
Руководитель образовательных
программ по направлению 27.04.06

_____ П.А. Аркин
«__» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

по направлению 27.04.06 Организация и управление наукоемкими
производствами

Выполнил

студент гр.24343/1

Б.А. Овчар

Руководитель

Заведующий БК ПУНП,

д.э.н., доцент

К.А. Соловейчик

Санкт-Петербург
2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Глава 1. Оперативно-производственное планирование машиностроительных предприятий	9
1.1. Характеристики оперативно-производственного планирования.....	14
1.2. Структура системы оперативно-производственного планирования машиностроительного производства.....	15
1.3. Базовые понятия оперативно-производственного планирования.....	17
1.4. Среда принятия решений оперативно-производственного планирования	21
Глава 2. Элементы системы оперативно-производственного планирования	30
2.1. Модели оперативно-производственного планирования.....	30
2.1.1. Ограничения моделей оперативно-производственного планирования	45
2.1.2. Целевые функции моделей оперативно-производственного планирования	50
2.1.3. Построение модели оперативно-производственного планирования.	52
2.2. Методы решения задач оперативно-производственного планирования	56
2.2.1. Точные алгоритмы	58
2.2.2. Приблизительные алгоритмы.....	61
2.3. Инструменты решения задач оперативно-производственного планирования.....	69
2.3.1. Требования к архитектуре инструментов оперативно- производственного планирования	74
Глава 3. Система оперативно-производственного планирования машиностроительных предприятий.....	82
3.1. Построение математической модели оперативно-производственного планирования машиностроительного производства	86

	5
3.2. Разработка алгоритмов решения задачи оперативно- производственного планирования	93
3.3. Апробация модели и методов решения задачи оперативно- производственного планирования	100
Заключение.	105
Список использованных источников	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В настоящее время отрасли промышленности встречают новую эру развития, предполагающую множество фундаментальных изменений. Следовательно, возникает необходимость в создании более гибких, адаптивных, надежных, быстрых и эффективных систем управления производством. Во многом успех функционирования предприятия определяет система оперативно-производственного планирования.

Разработка качественных и надежных оперативно-производственных планов может стать ключевым фактором повышения конкурентоспособности в удовлетворении спроса и эффективности производственных процессов. Задача оперативно-производственного планирования представляет особую сложность, что обусловило формирование чрезмерно фрагментированной и специализированной области, в которой различные аспекты и вопросы рассматриваются независимым образом. Кроме того, недостаточное количество исследований в сфере создания и внедрения целостных систем оперативно-производственного планирования не позволяет использовать полученные результаты для внедрения на машиностроительных предприятиях. Создание современных систем оперативно-производственного планирования на основе применения информационных технологий также является тенденцией развития промышленности на современном этапе.

Как в отечественной, так и в зарубежной науке накоплен большой опыт в сфере отдельных направлений оперативно-производственного планирования, математических моделей и методов, но в целом область по-прежнему остается проблемной и требует развития и изучения. В связи с этим, актуальным является развитие и разработка системы оперативно-производственного планирования как объединения моделей, методов, инструментов и человека. Это обусловило выбор темы и направление исследования.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются системы оперативно-производственного планирования машиностроительных

предприятий, предметом – модели, методы, инструменты, человек и их взаимосвязи в оперативно-производственном планировании.

Цель исследования состоит в формировании и раскрытии образа системы оперативно-производственного планирования на машиностроительном предприятии.

В соответствии с поставленной целью в работе были определены следующие задачи, требующие решения:

1. Сформировать образ системы оперативно-производственного планирования.
2. Проанализировать общие характеристики задач оперативно-производственного планирования.
3. Проанализировать элементы системы оперативно-производственного планирования: модели, методы, а также человека и его место в системе. Представить интеграцию элементов в единую систему.
4. Проанализировать инструменты оперативно-производственного планирования, разработать основные функциональные возможности, необходимые для создания инструмента оперативно-производственного планирования.
5. Разработать математическую модель оперативно-производственного планирования реального машиностроительного предприятия.
6. Разработать алгоритмы решения задачи оперативно-производственного планирования с возможностью взаимодействия с текущей системой управленческого учета на предприятии.

Теоретической и методологической базой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых в области оперативно-производственного планирования, внутрифирменного планирования, управления производством. Решение поставленных задач осуществлялось с применением системного подхода, математического программирования, дискретной оптимизации, методов математического моделирования, а также общенаучных теоретических и общелогических методов.

Информационную базу составляет информация, полученная в ходе прохождения производственной практики.

Научная новизна работы заключается в разработке математической модели оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия, которая с учетом ряда допущений соответствует производственному процессу реального машиностроительного предприятия, а также алгоритмов ее решения.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной математической модели и алгоритмов в процессе управления производством и для построения системы оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия или внедрения в существующие информационные системы управления предприятием.

Апробация результатов исследования прошла в рамках работы в центре управления производством ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» и в публикации научных статей в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. «Решение задачи оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия с помощью «жадного» и генетического алгоритмов» в журнале «Организатор производства», выпуск №2, 2018 г.

ГЛАВА 1. ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Управление производством – это процесс, требующий принятия большого количества решений, целью которых является обеспечение производства изделий наилучшего качества, с минимальными затратами и кратчайшими сроками исполнения. Эти решения различаются по степени их влияния на предприятие, масштабам и сроку принятия. Они варьируются от стратегических, высокоэффективных, долгосрочных решений, (например, принятие решения о том, будет ли какой-либо завод производить новый продукт) до краткосрочных, низкоуровневых, решений с низкой степенью влияния (например, какую деталь нужно изготавливать на конкретном рабочем центре в цехе). [11]

Учитывая различный характер и сроки принятия этих решений, а также вовлеченность лиц, принимающих решения разных для каждого уровня, управление производством традиционно распределяло ответственность путем принятия иерархической структуры, в которой последовательно принимаются различные решения. В верхней части этой структуры находятся задачи, связанные со стратегическим планированием развития предприятия, включающие постановку стратегических целей, определение мероприятий по достижению этих целей. [14] В широком смысле, подобные решения, называемые стратегическими, служат для создания на агрегированном уровне картины потенциала производственных мощностей и распределения ресурсов. Очевидно, что эти решения являются стратегическими, поскольку они оказывают огромное влияние на нижние уровни управления предприятием, и что связанные с этими решениями экономические и физические ресурсы обуславливают маловероятность или даже невозможность их пересмотра на срок менее, чем горизонт планирования, обычно измеряемый в годах.

После того как структура предприятия разработана, необходимо решить, как наилучшим образом использовать эту структуру. Эти решения обычно разделяются на среднесрочные решения (тактические решения) и краткосрочные решения (оперативные решения). Это различие может показаться немного

произвольным и действительно, оно может отличаться для разных производственных сценариев, но обычно такое отступление от нормы связано со сложностью производственного процесса, степенью детализации и качеством данных, требуемых для принятия решений. При планировании производственных ресурсов на следующий период, обычно равный году, то есть при определении наименований и объемов изделий и продуктов для производства, требуемых человеческих ресурсов, при планировании контрактов с поставщиками и т. д. ключевая информация, определяющая значительную часть производственного процесса (т.е. заказы от клиентов) не всегда известна. [26] Поэтому ключевые данные могут быть определены путем предположения или, в лучшем случае, оценки через статистические или другие методы прогнозирования спроса. Однако ясно, что качество этой оценки уменьшается по мере увеличения уровня детализации, поскольку легче оценить ежегодный спрос на семейство изделий, чем еженедельные продажи определенной модели. Поэтому обычно делают общий (агрегированный) годовой производственный план. Для его разработки исходной информацией и основой для принятия решений служит не оценка фактических изделий, которые будут продаваться, а оценка семей или групп изделий со схожим использованием производственных ресурсов. [29] Как следствие, агрегированный производственный план будет использоваться для оценки необходимых объемов производственных мощностей, объемов сырья, материалов и комплектующих и т.д., но не как итоговая информация о производственных заказах, которые должны быть переданы на уровень производственных подразделений. Этот план может корректироваться и уточняться в процессе производства. В дальнейшем, когда становятся известны необходимые объемы от отдела сбыта/продаж на период равный кварталу или месяцу, составляются оперативно-производственные планы. Данные планы более детально представляют подразделениям предприятия информацию по тому, какие производственные заказы должны быть выполнены в рамках месяца с разбивкой по неделям или декадам. На данном уровне расположена миссия оперативно-производственного планирования – определение заданий к изготовлению на имеющихся у предприятия

ограниченных ресурсах. Результатом оперативно-производственного планирования, в идеале, должен быть оперативно-производственный план или график, где определено, какая работа должна выполняться на каждом рабочем месте, и когда.

Поскольку фактический ход производства и редко в точности совпадает с планами (причиной тому могут быть различные факторы производственной среды), необходимо вносить корректировки в план, чтобы учесть влияние непредвиденных событий и этот процесс может повторяться множество раз. [14] В качестве примеров непредвиденных событий можно указать: выход оборудования из строя, срочные заказы, отмена существующих заказов. Во всех этих случаях производственные планы, вероятно, придется перестроить. Стоит обратить внимание на то, что процесс перепланирования может, на самом деле, означать создание полного подробного плана, учитывающего новую ситуацию в производстве. В данной работе, различие между планированием и перепланированием рассматривается со следующей точки зрения: планирование направлено на улучшение целевых показателей производительности системы, перепланирование стремится минимизировать влияние событий ранее не учтенных, но оказывающих существенное влияние на план. Иногда может быть целесообразнее изменить существующий график, чтобы максимально приспособить производство под неожиданные обстоятельства вместо того, чтобы разрабатывать новый план с самого начала, полностью учитывая влияние новых событий.

Пределно ясно, что цели и период времени, в рамках которых рассматривается принятие конкретных решений значительно влияют на качество данных, используемых, для поддержания процесса принятия решений. Так, например, долгосрочные решения обычно основываются на предположениях о развитии рынка и на внутренних ресурсах в компании, и таким образом по своей природе менее поддаются формализации, используя существующие методы, которые требуют высокой точности и качества исходных данных для принятия наилучшего решения. [3] Кроме того, не всегда возможна формализация процесса принятия решений, так как изменяющаяся природа бизнеса и большие промежутки

времени между двумя последовательными решениями данного уровня делает их уникальными на практике. В данном случае, человеческое суждение на основе экспертных знаний и оценка нескольких ключевых показателей являются достаточными для принятия решений такого уровня. С другой стороны, повторяющаяся природа краткосрочных решений делают их подходящими для формализации и построения моделей принятия решений, которые в большинстве случаев будут приводить к наилучшим результатам. Таким образом, становится возможным рассматривать управленческие решения как оптимизационные задачи. Эти две характеристики (повторяющаяся природа процесса принятия решений и большой объем данных, требуемых для принятия решений) делают количественные, процедурные методы конкурентоспособными по сравнению с человеческим субъективным опытом.

Важно отметить, что планирование не только служит для составления подробных планов, но также может использоваться в качестве источника информации для различных бизнес-процессов на предприятии, например для систем планирования ресурсов (MRP), или для предоставления данных для оценки нового заказа, или для принятия решения о принятии/отказе заказов. [18] Здесь можно увидеть тесную взаимосвязь планирования с другими бизнес-функциями, и нередко различие между планированием и этими функциями будет неявно. Исходя из целей данной работы, мы исключаем рассмотрение вопросов планирования решений, для которых уровень детализации, рассматриваемый в разрезе времени, ресурсов, изделий или клиентов, недостаточен для того, чтобы конкретный план был немедленно переведен к выполнению на уровень производства.

Учитывая высокий уровень взаимосвязи между различными решениями в управлении производством (включая оперативно-производственное планирование), показанными в предыдущих параграфах, может возникнуть желание попытаться установить приоритетность этих решений, с тем чтобы более эффективно распределять ограниченные финансовые и человеческие ресурсы. Однако в данной работе примем, что обсуждение того, какая функция важнее – планирование или управление качеством, координация цепочек поставок или разработка новых

изделий не является предметом рассмотрения и не способно привести к решению практической задачи. Без эффективного управления производством развитие системы оперативно-производственного планирования не поможет улучшить результаты работы предприятия независимо от того, насколько хорошо выполняется функция планирования. [1] Тем не менее, вопросы планирования производства являются одними из ключевых бизнес-решений для промышленных компаний. Важность планирования в значительной степени зависит от стратегически важных производственных решений для получения конкурентных преимуществ. Например, для компаний, пытающихся продать небольшой ассортимент новых продуктов, которые с готовностью принимаются на рынке с небольшой конкуренцией, вопросы оперативно-производственного планирования могут быть не так важны, как для компаний, производящих широкий спектр продуктов. Планирование может помочь им получить преимущество по сравнению с конкурентами. Качество планирования часто является ключевым фактором, если изделия и предприятие достаточно развиты. [80]

Так как планирование тесно связано с распределением ресурсов, также очевидно, что его важность увеличилась бы с возникновением конфликта использования ограниченных ресурсов. В истории развития промышленного производства наличие конфликта использования ресурсов традиционно выносили за скобки путем проектирования цеха, производящего ограниченный диапазон изделий со схожими технологическими требованиями. Тенденции к общей персонализации производимых изделий, сокращению жизненных циклов продукта, увеличению конкуренции, основанной на времени, и к глобализации (с соответствующим увеличением конкуренции) сделала такой подход недопустимым для большинства предприятий.

Таким образом, представляется, что нет никакого другого пути развития машиностроительного производства, кроме как использование оперативно-производственного планирования. Оперативно-производственное планирование с достаточной детализацией, со всеми его сложностями и огромными

возможностями является наиболее перспективным направлением улучшения оперативного уровня управления машиностроительным предприятием.

1.1. Характеристики оперативно-производственного планирования

Оперативно-производственное планирование может по-разному осуществляться в различных организациях, однако во всех частных случаях сохраняются общие характеристики, присущие каждой системе. В данном разделе подобные характеристики будут рассмотрены с целью достижения определенного уровня абстракции, необходимого для формулирования универсальной структуры, которая может быть полезной не только для машиностроительных, но и для многих других производственных предприятий. Данными характеристиками являются:

- Вычислительно сложные решения. Так как решение задач включает разработку подробных планов распределения работ и ресурсов во времени. Несмотря на возможную вариативность относительно разных предприятий, существует универсальная тенденция увеличения сложности изготавливаемых изделий и их кастомизации для удовлетворения требований заказчика. Это также влияет на увеличение сложности производственного процесса.

- Решения оперативно-производственного планирования – краткосрочные решения, которые могут быть пересмотрены много раз. Конкретный оперативный план остается актуальным достаточно короткий период времени и с изменениями производственной системы также должен быть изменен.

- Несмотря на краткосрочность принимаемых решений, оперативно-производственное планирование является наиболее важным на нижних уровнях предприятия, поскольку там определяется время изготовления и стоимость изделий, которая на долгосрочном периоде затрагивает все уровни предприятия, а также конкурентоспособность в разрезе затрат на производство и сроков изготовления.

- Как процесс принятия решений, лежащий в основе деятельности промышленного предприятия, так и условия, особенности, ограничения и цели при оперативно-производственном планировании уникальны для каждого предприятия.

- Решения вопросов оперативно-производственного планирования можно назвать относительно структурированными решениями, по крайней мере по сравнению с другими вопросами, требующими принятия решений в компании.

Таким образом, рассмотрев обобщенные характеристики задач оперативно-производственного планирования можно сделать вывод, что в настоящее время нет никакого способа отказаться от создания системы планирования на промышленных предприятиях и особенно на предприятиях отрасли машиностроения. В современных реалиях этот факт иногда приводит к недооценке потенциальных преимуществ качественной системы планирования: производственные менеджеры предприятия утверждают, что они уже «планируют». Правда заключается в том, что чаще всего такое «планирование» представляет собой неструктурированную, зависящую от опыта сотрудников и экспертных оценок, также оперирующую неполным объемом информации о производственном процессе и в большей степени направленную только на достижение желаемого результата систему. Последствиями такого подхода можно считать: неэффективное использование ресурсов, неритмичную загрузку производства, увеличение времени на выполнение производственной программы, увеличение материальных и складских запасов.

1.2. Структура системы оперативно-производственного планирования машиностроительного производства

Как было представлено в предыдущих разделах, планирование представляет собой процесс итеративного принятия решений, связанного с назначением ресурсов для производства ряда изделий на протяжении определенного времени. Этот процесс осуществляется сотрудниками предприятия (сотрудниками планово-распорядительных бюро или другими лицами, принимающими решения), которым может помочь программный продукт, способный моделировать некоторые проблемы, возникающие в ходе этого процесса, и находить решение для них, используя специальные методы или алгоритмы на этих моделях. В данном определении можно отметить четыре важных момента:

Во-первых, планирование – это процесс. Речь идет не о формулировке и решении конкретной проблемы, или о повторном решении одной и той же проблемы снова и снова. Такой подход можно назвать динамическим, в нем подчеркивается факт, что оперативно-производственное планирование – это бизнес-процесс, которым нужно управлять наряду с другими бизнес-процессами производственной системы. [18]

Во-вторых, процесс планирования должен выполняться сотрудником, командой или организацией. Образ полностью автоматизированных систем, рассчитывающих расписание, отслеживающих все изменения и принимающих решения без руководства человеком, является достаточно удаленным от текущих возможностей систем управления и скорее всего не сможет отражать реальную картину для большинства машиностроительных предприятий. Поэтому необходимо понимание и включение человеческого элемента в процесс принятия решений.

В-третьих, относительно структурированный характер процесса планирования и присущая ему сложность приводят, естественно, к необходимости формулирования задачи с точки зрения математических моделей для лучшей оценки решений, которые должны быть приняты планировщиками, а также использованию соответствующих методов для решения задач. Однако формулировка моделей и реализация решений, получаемых соответствующими методами, является трудной, нетривиальной задачей, которая должна контролироваться человеком.

В-четвертых, несмотря на то, что планировщик не нуждается в инструменте, самостоятельно принимающем решения, в большинстве случаев нецелесообразно полностью отказываться от применения программных инструментов. Существенный объем информации, относящейся к ресурсам и операциям, рабочим центрам, срокам, и других сведений, присущих любому машиностроительному производству, является достаточным обоснованием необходимости такого инструмента. Программное обеспечение может быть электронной таблицей, «готовым» программным продуктом или продвинутым инструментом планирования.

Из приведенного выше следует, что для принятия эффективных решений в оперативно-производственном планировании необходима система, т. е. набор элементов. Сочетание моделей, методов и инструментов с человеком, участвующими в процессе оперативно-производственного планирования – это то, что в данной работе будет рассматриваться как система оперативно-производственного планирования, образ системы представлен на рис. 1. Модели планирования, методы решения и программные продукты играют важную роль по отдельности, но для получения наиболее эффективных результатов их использование необходимо объединить в систему. Таким образом, целостное представление – в отличие от технического или представления, связанного с оптимизацией – необходимо для получения полной картины оперативно-производственного планирования. Далее в работе будут представлены различные элементы системы оперативно-производственного планирования. В следующем разделе будут рассмотрены базовые понятия.



Рис. 1.1. Образ системы оперативно-производственного планирования

1.3. Базовые понятия оперативно-производственного планирования

Формализовав идеи, приведенные в предыдущих разделах, можно определить планирование производства как процесс принятия решений, состоящий из назначения набора операций / работ, необходимых для производства набора изделий для существующих ресурсов в производстве, а также периодов времени

для начала этих операции / работ. График определяется как конкретное назначение этих операций / работ ресурсам относительно времени. Таким образом, производственный план полностью определяет, когда должна начаться каждая операция / работа, и именно это считается основным результатом оперативно-производственного планирования.

Изделия, которые должны быть произведены, или детали и сборочные единицы (ДСЕ), на которые можно разделить любое изделие, обычно упоминаются в литературе по планированию просто как «работа» или «задание». [81] Далее в данной работе также будет принято существование таких единиц «работы», однако, концепция «работы» не однозначна, поскольку она напрямую зависит от предприятия, контекста и производственных условий.

Операции, которые необходимы для изготовления ДСЕ или выполнения работ, требуют различных производственных ресурсов. Ресурсы могут варьироваться от дешевых инструментов и приспособлений до самых современных станков или оборудования. В данной работе будет принято, что возможно определить необходимые производственные ресурсы, и, в соответствие с литературой по планированию, будем называть такие ресурсы «рабочими центрами» (РЦ). Как и в случае с «работами», понятие «рабочий центр» – это абстракция, введенная для моделирования производственных процессов. Для расчета производительности подразделений предприятия цех со всеми ресурсами можно рассматривать как «рабочий центр», но для расчета оперативно-производственных планов, обеспечивающих ежедневные расписания для каждого станка, такого уровня обобщения явно недостаточно. [8]

Кроме того, существует множество технических / производственных / экономических характеристик работ, рабочих центров и технологических операций на РЦ, которые должны учитываться в процессе планирования. [19] Данный вопрос будет более детально рассмотрен далее в работе, однако сейчас будут представлены наиболее значимые характеристики:

- Существует специализация РЦ: не все РЦ могут выполнять все операции, необходимые для каждой из работ. РЦ, как правило, способны выполнять только

один или несколько типов операций. В случае, если РЦ может выполнять несколько типов операций (например, рабочий многостаночник или универсальные станки), эффективность их выполнения может быть неравной и соответственно может быть определена в виде предпочтений / исключений.

- Порядок, в котором различные операции должны быть выполнены, как правило, фиксируется с учетом конкретной технологии производства, т. е. существует предопределенный порядок операций для каждой работы, который должен строго соблюдаться. Эту последовательность также называют маршрутом обработки.

- В общем виде, различные работы имеют различные требования в отношении технических, производственных и экономических аспектов. С технической точки зрения, даже если две работы имеют одинаковый маршрут обработки, некоторые характеристики операций (например, время обработки или время настройки) могут отличаться. С точки зрения управления производством / экономики, технически идентичные рабочие места могут иметь разные сроки выполнения, установленные заказчиком, или иметь разную рентабельность производства, или могут требовать материалов, которые затруднительно приобретать в настоящий момент. [77]

- Все или часть операций и работ могут допускать так называемое прерывание изготовления, которое заключается в возможности (для всех или некоторых работ) прерывания выполнения операции после ее начала. Если такая возможность существует, выполнение операции может быть остановлено и возобновлено позже как без, так и с возможными последствиями прерывания. Существуют примеры производств как с возможностью прерывать изготовление, так и с запретом на прерывания. В качестве примера можно привести химическую промышленность, литейное производство и любое другое непрерывное производство. Требования непрерывности чаще всего связаны с тем, что производственный процесс представляет собой постепенное изменение физических и химических свойств материала, процесс, который, в целом, невозможно развернуть обратно и получить свойства исходного материала. Несмотря на то, что

некоторые операции по сборке являются дискретными, по крайней мере с технологической точки зрения, могут существовать управленческие / экономические соображения, сдерживающие или препятствующие прерыванию таких операций. [17]

Как уже было написано ранее, это лишь часть характеристик, которые должны учитываться в процессе оперативно-производственного планирования. Как следствие, не каждый план, который можно построить, будет учитывать все характеристики. В таком случае этот оперативный план обозначается как неосуществимый план, соответственно, его нельзя передавать в производство к исполнению. Очевидно, что главная цель в процессе оперативно-производственного планирования – найти хотя бы один выполнимый план. При условии наличия нескольких возможных планов цель состоит в том, чтобы выбрать (по крайней мере) один выполнимый план из доступного набора.

Таким образом, оперативное планирование производства можно рассматривать как проблему принятия решений, т. е. процесс выбора наилучшей последовательности действий среди нескольких альтернативных вариантов. Для этого необходимо определить одну или несколько метрик (или критериев), характеризующих требуемые функции плана. После установки критериев становится возможно (по крайней мере технически) сравнить различные планы и выбрать один, дающий лучшее значение (максимальное или минимальное) этого критерия среди всех возможных вариантов.

Для машиностроительных производств показатели обычно подразделяются на категории: стоимости (иногда прибыли), времени, качества и гибкости. В работе будут детально рассмотрены показатели и представлена классификация на основании времени завершения работ. В общем представлении, время завершения работы в конкретном плане – это время, которое необходимо на выполнение всех работ в производстве. Следует обратить внимание на то, что знание момента времени завершения всех работ по плану можно использовать для определения вероятности срывов сроков отгрузки или для нахождения среднего времени, необходимого для выполнения всего объема работ.

Далее в работе будет представлена среда для принятия решений оперативно-производственного планирования. Рассмотрение представляет собой анализ системы оперативно-производственного планирования машиностроительного производства с точки зрения ее взаимодействия как внутри, так и с внешним миром.

1.4. Среда принятия решений оперативно-производственного планирования

В данном разделе будут рассмотрены главные аспекты, влияющие на процесс принятия решений в оперативно-производственном планировании. Будет применен подход системного анализа, который состоит в том, что система может быть охарактеризована объектами, из которых она состоит, и их взаимодействиями, а также закрытостью или открытостью. Систему оперативно-производственного планирования можно интерпретировать как закрытую систему в случае, когда оно изучается как изолированный процесс принятия решений, а также как открытую систему, если основное внимание уделяется ее связи с другими процессами принятия решений. Это двойное (открытое и закрытое) представление будет рассмотрено в данном разделе.

Сначала рассмотрим систему как закрытую. Важным представляется классификация задач планирования, рассмотрения понятия сложности планирования и связанных вопросов, также вопросов вариативности системы.

Задачи и решения производственного планирования можно классифицировать по различным параметрам или элементам. Наиболее часто используемые из них представлены далее:

- Детерминированные и стохастические. В случае, когда все характеристики задачи планирования (время обработки каждой операции, момент завершения обработки, и т. д.) известны заранее и однозначны, проблема планирования имеет детерминированный тип. Напротив, проблема считается стохастической, если хотя бы одна из характеристик не известна точно, а только с определенной степенью вероятности.

- Статические и динамические. Если все соответствующие данные задачи планирования известны заранее, т. е. в момент начала процедуры оперативно-производственного планирования, то задача классифицируется как статическая. Если до завершения выполнения графика необходимо включить новую информацию, то задача планирования называется динамической.

- Организация процесса принятия решений: централизованный и децентрализованный. В централизованной производственной среде весь процесс изготовления продукции планируется для всех подразделений и всех РЦ центральной властью планирования. Главной задачей обеспечения эффективного функционирования таких систем заключается в предоставлении этому учреждению всей необходимой информации. В децентрализованных системах, в каждом подразделении отдельно существуют отделы планирования. Подразделения и, соответственно, плановые отделы, конечно же, должны взаимодействовать друг с другом. Поэтому одной из основных задач при создании децентрализованных систем планирования является тщательная организация взаимодействия подразделений и создание соответствующей информационной системы оперативно-производственного планирования.

- Область действия разрабатываемого плана: полное или частичное планирование. Если результат процесса планирования не завершен, он называется частичным планированием. Неполнота может относиться ко многим элементам. Например, не все машины и/или типы операций могут быть рассмотрены, горизонт планирования может быть преднамеренно ограничен и т.д. В хорошо организованной системе оперативно-производственного планирования последствия таких ограничений должны быть заранее рассмотрены и тщательно изучены.

Таким образом, данная структура рассматривает параметры закрытой системы оперативно-производственного планирования и может быть использована для классификации задач планирования.

«Сложность» планирования во многих контекстах часто используется как довольно туманное понятие или выражение. В сфере оперативно-производственного планирования машиностроительного производства понятие «сложности»

может быть ограничено формальной сферой или может быть рассмотрено в более общем плане, после чего понятие сложности распространяется на практическую сферу.

В формальной сфере говоря о сложности планирования чаще всего рассматривают вопрос сложности конкретной формальной задачи и соответствующих алгоритмов ее решения. Данный тип сложности называют вычислительной сложностью. [67]

Концепция вычислительной сложности служит для разделения алгоритмов, вычислительные усилия которых могут быть ограничены некоторой полиномиальной функцией некоторых характеристик формальной задачи из тех, где такой полиномиальный предел еще не получен и где он, вероятно, никогда не будет найден. [89] Это разделение оправдано тем фактом, что полиномиальные подходы обычно могут быть выполнены в рамках разумных вычислительных усилий, в то время как неполиномиальные алгоритмы не могут.

В частности, алгоритмы, выполняющие явное или неявное перечисление каждого возможного решения, относятся к неполиномиальному типу. [86] Также важно отметить, что полиномиальное / неполиномиальное поведение алгоритмов относится к наихудшему результату и не дает никакого представления о его среднестатистическом поведении. Напротив, с точки зрения реального применения, неполиномиальный алгоритм может достичь хорошего или даже оптимального решения за разумные вычислительные сроки. С практической точки зрения, это дает основание преждевременно останавливать работу алгоритма, особенно если есть информация, что максимальное отклонение текущего решения от оптимального решения приемлемо. [89]

Общепринято, что реальные задачи оперативно-производственного планирования являются сложными и соответствующие им формальные проблемы также сложны. Поэтому предлагается структурировать сложность задач реального мира и тем самым обозначить направления для развития проблемы управления сложностью.

Проблемы принятия решения в реальном мире обычно отличаются сложностью структуры. Наиболее важными элементами структуры можно выделить:

- разные цели, не всегда достаточно четкие;
- большое разнообразие заранее не заданных ограничений;
- большое, возможно даже не четко оговоренное, количество возможных действий;
- иерархическая или недостаточно четко определенная система планирования и принятия решений и лиц, принимающих решения;
- сложность, вызванная динамикой и неопределенностью;
- взаимодействие всех упомянутых выше аспектов в рамках их категории и между категориями.

Как указывалось ранее, нет четкого определения сложности, однако одной из существующих классификаций и наиболее распространенной является классификация сложности под авторством Reiss. [85] Reiss классифицирует аспекты сложности на 2 группы:

- Массовые аспекты, далее разделяемые на кратность, т.е. количество элементов и взаимодействия в системе, и дисперсию, т.е. количество различных элементов и их взаимодействия.
- Хаотичные аспекты, далее разделяемые на неоднозначность, т.е. степень неопределенности характеристик элементов и взаимодействий в системе, и изменчивость, т.е. изменения характеристик элементов и характера взаимодействий во времени. [35]

Общая схема классификации представлена в виде таблицы (табл.1.1). Используя данную схему для классификации задач принятия решений, можно не только систематизировать понимание сложности задачи, но и получить необходимую информацию для преодоления сложности, например, путем упрощения рассматриваемой задачи. Применяя эту схему конкретно к задачам оперативно-производственного планирования машиностроительных производств можно

определить разнообразие задачи, например, по количеству РЦ, операций, работ и т.д.

Таблица 1.1

Краткое изложение классификации сложности

Аспекты сложности		Примеры в оперативно-производственном планировании машиностроительных производств
Массовые	Кратность	Количество работ, операций, РЦ и т.д.
	Дисперсия	Разнообразие времени изготовления, количества и типов необходимых операций и т.д.
Хаотичные	Неоднозначность	Неопределенность времени изготовления, времени выпуска и т.д.
	Изменчивость	Поступление новых заказов, выход из строя РЦ и т.д.

Следует отметить, что сложность задачи принятия решений, в нашем случае задачи оперативно-производственного планирования, относится не только к структурным характеристикам объектов планирования и их взаимосвязям, но и к самой процедуре планирования, включая время, необходимое на построение оперативных планов. Следует принимать во внимание, что время на решения задач и построение планов должно быть минимизировано с той целью, чтобы план не устаревал на момент, когда он сформирован. Данный вопрос затрагивает не только эффективность разрабатываемых алгоритмов, но и аспекты информационной поддержки и управления базами производственного учета одновременно с точки зрения ввода и вывода информации. [64]

Используя данную концепцию структуризации сложности и применяя ее к задачам оперативно-производственного планирования можно получить ценные идеи о том, как сделать реальную проблему планирования управляемой.

В целом, вариативность – это термин, который указывает на поведение системы по отношению к отклонению от однородности. Если вариативность поддается количественной оценке, она обычно выражается коэффициентом вариации соответствующего контекста. Далее будут рассмотрены вопросы влияния аспектов вариативности на уровне оперативно-производственного управления.

Исходные данные для оперативного планирования с верхних уровней управления производством, как правило, включают информацию о спросе, такую как тип и необходимое количество изделий, дата отгрузки и т.д. В большинстве случаев эти данные принимаются в неизменном виде в качестве исходной информации. [13] Однако, с одной стороны, эти данные часто не так жестко зафиксированы, как утверждает отдел сбыта, продаж или кто-либо другой немного удаленный от производственной среды. На предприятиях, где изготовление изделий идет на склад, целевые показатели отгрузки, полученные из прогноза спроса, могут изменяться и обсуждаться; точно такая же ситуация наблюдается со сроками выполнения на предприятиях с позаказной работой. С другой стороны, если данные показывают о спросе высокую или растущую вариативность, то степень вариативности не может быть уменьшена. В таких случаях, чтобы справиться с влиянием вариативности, можно использовать буферы. В качестве буферов могут выступать ресурсы времени, запасов изделий на складах или запасы материалов, комплектующих, а также наличие заделов для трудоемких деталей.

Последним вопросом, касающимся вариативности, является доступность и качество данных. Если в модели планирования указываются фиксированные сроки изготовления и сроки отгрузки, то при переходе к реальным условиям эти даты, в значительной части случаев, не будут такими детерминированными. Поэтому, учитывая степень неопределенности и вариативности этих данных, в моделях необходимо предусматривать временные буферы. Другим возможным подходом может быть максимальная стандартизация или стабилизация системы с целью уменьшения вариативности. Стабилизации можно достичь за счет автоматизации, стандартизации процессов, вытягивающей системы обеспечения материалами и комплектующими и т.д.

Далее перейдем к рассмотрению открытого представления системы. Для оперативно-производственного планирования рассмотрение открытого представления означает анализ взаимосвязей с другими (связанными) проблемами и процессами принятия решений. Соответственно, необходимо сначала разобраться

вопросы связи между оперативно-производственным планированием и остальными управленческими решениями на производстве в целом.

Все вопросы принятия управленческих решений в области машиностроительного производства можно разделить на два направления: область принимаемых решений, ранее уже кратко рассмотренная в данном разделе, и логистические потоки изделий, которые нужно произвести.

Первое направление относится к сфере управленческих решений. В каждой компании принимается множество различных решений на разных уровнях руководства предприятия и с разной важностью. Как правило, эти решения не являются самостоятельными, а должны согласовываться со многими другими решениями. В зависимости от их актуальности для компании в целом, временного горизонта воздействия принимаемых решений и степени детализации информации и принимаемых решений, они обычно характеризуются как стратегические, тактические и оперативные решения, связанные с планированием. [27] Стратегическое планирование относится к долгосрочным и концептуальным задачам принятия решений по созданию и поддержанию динамической обстановки для долгосрочного успеха компании. Тактическое планирование решает среднесрочные задачи и задачи распределения ресурсов, т. е. настройки инфраструктуры для успешного функционирования предприятия, в то время как оперативно-производственное планирование решает вопросы краткосрочной природы в рамках данной инфраструктуры по внешне заданным требованиям: выполнение заказов/работ и т. д. [9]

Согласно этому направлению, оперативно-производственное планирование является частью управления производством в разрезе выполнения производственных задач в рамках данной производственной инфраструктуры – а не планирования самой инфраструктуры. [14] Соответственно, многие задачи принятия решений, связанные с оперативно-производственным планированием, включают в себя довольно краткосрочные и оперативные горизонты планирования.

Второе направление относится к логистике производственной деятельности или внутривозвратской логистике, которая представляет собой производство

изделий или промежуточного передела, которые составляют продукты/услуги и обозначаются как выпускная продукция предприятия. Производство этих изделий требует производственных ресурсов, либо закупаемых извне, либо изготавливаемых собственными силами. Этот процесс преобразования входов в выходы является производственным процессом. [16]

В последние годы, оперативно-производственное планирование стало считаться одной из наиболее важных сфер управления производствами, как с теоретической точки зрения, так и на практике.

Таким образом, в данном разделе представлен концептуальный образ системы оперативно-производственного планирования, который будет использоваться далее в работе. Также определено значение оперативно-производственного планирования на машиностроительном производстве и указано, какие сферы будут рассмотрены в рамках данной работы. Рассмотрены базовые понятия оперативно-производственного планирования.

Была представлена основа для принятия решений по оперативно-производственному планированию, использующая двойное представление (открытое/закрытое), исходящее из системного анализа. Рассмотрено закрытое представление производственного планирования как изолированной проблемной области, связанные с этим процессы принятия решений и главные аспекты, влияющие на эти решения. Напротив, в открытом представлении главным образом рассмотрена взаимосвязь оперативно-производственного планирования с другими аспектами управления предприятием и ее цепочке поставок.

Этот раздел является концептуальным представлением, и многие из рассмотренных здесь сфер, вопросов и идей заслуживают более детального рассмотрения. Они были сведены к минимуму, чтобы дать основу для понимания контекста, в котором происходит оперативно-производственное планирование. В некоторых случаях недостаточное понимание контекста является одной из причин, приводящих к плохому проектированию систем планирования и недооценке или переоценке важности планирования решений в некоторых производственных условиях.

Следующий раздел будет посвящен моделям оперативно-производственного планирования.

ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

2.1. Модели оперативно-производственного планирования

Как уже упоминалось ранее, планирование является процессом принятия решений, в котором для решения реальной проблемы строится формальная модель. Данный раздел посвящен моделям оперативно-производственного планирования и рассматривает составляющие модели (работы / рабочие центры / операции, ограничения, критерии), а также основные вопросы, связанные с построением моделей.

Моделирование лежит в основе научного подхода к решению проблем. Реальность чрезвычайно сложна и разнообразна. Модели дают некоторую грубую классификацию проблем и их параметров в попытке направить исследователя в правильном направлении. Модель – это урезанное, упрощенное и абстрактное представление сложной, детализированной и обширной реальности. [15] Таким образом, моделирование является процессом формирования абстрактных и концептуальных моделей, которые будут полезны исследователям и практикам. Моделирование само по себе является наукой, которая проистекает из философии науки, теории систем, визуализации данных и знаний, статистики и многих других отраслей науки.

Модели представляют объекты или структуры, имеющие эмпирическое существование. При планировании производства исследователь должен будет моделировать все соответствующие производственные ресурсы. То, как построена модель, тесно связано с предполагаемым использованием самой модели. [2]

Модели имеют многочисленное количество характеристик и особенностей, основные из них представлены далее:

- Модели сосредоточены на определенных аспектах реальности.
- Модели всегда имеют отношение к реальности или объекту, который они представляют. Характер модели и процесс построения модели будут варьироваться в зависимости от предполагаемого использования. [48]

- Модель отличается от реальности. Это должно быть упрощение. Если модель точно соответствует реальности, она является копией моделируемого объекта.

- Как результат двух предыдущих пунктов, модель всегда является компромиссом между уровнем точности / подробности и упрощением.

- Результаты, полученные в результате экспериментов модели, должны быть легко измеримы. Это особенно важно, когда такие же измерения над моделируемой реальностью невозможны или непрактичны. [73]

- Модели могут использоваться для изучения изменения реальных объектов. После того, как модель считается соответствующей моделируемой реальности, могут быть построены модели для изучения сценариев «А что, если?» с разными условиями, с некоторой степенью уверенности в соответствии получаемых результатов реальным, которые иначе было бы невозможно изучить.

- Модели позволяют объяснить прошлые события, предсказать или опровергнуть будущие результаты, утвердить гипотезы над моделируемой реальностью.

- Модели должны быть простыми в работе, одной из причин моделирования реальности является ее сложность.

- Модели полны ограничений. Интерпретация результатов модели справедлива только для этой модели, и экстраполяция на реальность должна быть сделана правильным способом. До того, как результаты модели будут использоваться на практике, они должны быть тщательно изучены для полной уверенности в соответствии результатов модели и реальности.

Таким образом, введено определение модели, представлены основные характеристики.

Далее будут рассмотрены различные типы моделей и наиболее частые ошибки при моделировании. Модели варьируются от простых схем до сложных эволюционных систем. Следующий список представляет основные типы моделей, которые используются при решении задач оперативно-производственного планирования:

- Математические модели: математическое программирование, линейное программирование, нелинейное программирование, детерминированные, вероятностные и т.п.

- Графические модели: пиктограммы, рисунки, диаграммы Венна, диаграммы потоков, сетевые графики и т. д.

- Статистические модели.

- Имитационные модели.

- Алгоритмические модели.

Математическое и алгоритмическое моделирование составляют основную часть типов моделей, используемых в детерминированном планировании. [28, 31]

Модели не являются панацеей, поскольку независимо от того, насколько совершенным является анализ результатов модели, выводы всего исследования могут быть полностью ошибочными из-за бесчисленной серии проблем, которые существуют в процессе моделирования. Далее предоставлен только краткий список из них:

1. Модель может быть неполной.
2. Модель может опираться на неточные или неполные данные. Таким образом, выводы из его исследования могут быть далеки от реальности.
3. Модель работает только при серьезных допущениях и ограничениях, которые препятствуют ее общности и беспристрастности.
4. Модель может быть слишком сложной для решения проблем реального размера.
5. Неправильная процедура проверки результатов модели. Отсутствие надежной статистической проверки отобранных результатов.
6. Использование нерепрезентативных примеров в тестах модели.
7. Предвзятость или даже мошенничество в интерпретации результатов модели.
8. Трудности с воспроизведением результатов.

9. Ошибки рассуждения, нарушение причинно-следственных связей, принятие корреляции за причинно-следственную связь и т. д.

Если модель планирования слишком проста, результирующее производственное планирование будет в лучшем случае ориентировано на задачу моделирования производственного планирования. Во многих экстремальных случаях изученная модель планирования настолько упрощена, что результаты могут быть полностью не соответствовать практике. Кроме того, многие модели планирования строятся при значительном количестве допущений, которые приводят к разрывам с реальностью. Точно так же сложные модели во много раз труднее решить с помощью современных технологий и, зачастую, решения существуют только для небольших проблем. [25] Таким образом, правильная формулировка достаточно точных моделей планирования производства является одной из основных проблем в области планирования.

Некоторые основные определения, связанные с оперативно-производственным планированием, уже были представлены в предыдущем разделе. Далее будут более детально рассмотрены все элементы, предоставлены формальные определения, а также математическое обозначение, которое можно использовать для моделирования задач оперативно-производственного планирования.

Модель планирования – это формальное представление производственной задачи оперативно-производственного планирования, которая описывается с учетом системы работ / операций, ограничений и критериев.

Приведенное выше определение более или менее эквивалентно задаче оперативно-производственного планирования в большинстве работ по данной теме. Однако здесь важно подчеркнуть, что решение реальных задач планирования начинается с их моделирования (отсюда и потребность в моделях планирования), далее, происходит поиска методов, которые позволяют решить эту модель, а не начальную реальную проблему, и после этого, полученные решения переносятся в реальный мир.

Будем считать, что модель планирования определяется известным, конечным и детерминированным числом работ, которые должны быть обработаны на

определенном количестве рабочих центров. Хотя мы уже обсуждали ранее, что все эти допущения приемлемы не во всех ситуациях, начнем с простых случаев для того, чтобы получить основу, необходимую для решения более сложных задач.

Предположим, что существует множество D – работ, которые последовательно индексируются $D = \{1, 2, \dots, D_i\}$. Таким образом, необходимо выполнить в общей сложности D_i различных типов работ. Аналогично существует множество M – рабочих центров, которые индексируются как $m = \{1, 2, \dots, M_m\}$.

Каждая работа состоит из определенного набора операций. Операции обозначаются как O_{ij} , что означает выполнение j -ой операции i -ой работы. Кроме того, каждая операция должна быть запланирована – это означает, что для каждой операции будут существовать время начала и окончания. Они будут обозначаться как S_{ij} и C_{ij} , соответственно.

Время обработки (p_{ij}) – это промежуток времени, который необходим для выполнения j -ой операции по i -ой работе.

Представленные выше параметры – это самые главные параметры любой задачи оперативно-производственного планирования, однако существует множество различных данных, которые могут быть связаны с этими параметрами.

В настоящее время исследования по оперативно-производственному планированию разделены на направления в соответствии с тем, как расположены рабочие центры в множестве M , а также в соответствии с тем, как указаны различные маршруты обработки работ. [82, 84] Наиболее типичные примеры обсуждаются далее. Если не указано иное, предполагается, в примерах, что РЦ всегда доступны для обработки и что приоритетное использование РЦ не допускается по причинам сохранения простоты рассматриваемых примеров.

Самым простым из рассматриваемых примеров является расположение, в котором участвует только один РЦ, т.е. каждая операция над каждой деталью будет выполняться один раз именно на этом РЦ. Таким образом, в действительности маршрутов обработки нет. Модели с одним РЦ достаточно просты и часто рассматриваются исключительно как теоретические. Тем не менее, они могут

рассматриваться как частные случаи более сложных моделей, и их изучение в таком случае представляет значительно больший интерес. Кроме того, как уже обсуждалось ранее, модели с одним РЦ могут адекватно представлять, при определенных обстоятельствах, более крупные реальные объекты на уровне цеха или всего производства. [83]

Схема производственного потока для одного РЦ предельно простая: работы поступают на РЦ и в оперативном плане на период обработки РЦ становятся занятым, после завершения покидают РЦ.

После одного РЦ самым простым путем усложнения модели является добавление производственной мощности за счет добавления нескольких таких РЦ – создание параллельных рабочих центров. Маршруты обработки изделий также просты – каждая операция должна быть выполнена на одном из доступных параллельных РЦ.

Модели с параллельными РЦ интересны тем, что в оперативно-производственном планировании добавляется дополнительная размерность. Оперативный план может представлять назначение каждой работы на каждую машину и определенную последовательность выполнения работ для каждого РЦ. Схема производственного потока для параллельных РЦ также проста: работы поступают в производство, закрепляются за одним из доступных РЦ, обрабатываются и после покидают производство.

Модели параллельных РЦ далее могут быть разделены на 3 подтипа:

- Одинаковые параллельные РЦ. Все РЦ одинаковы относительно времени выполнения работ. Соответственно, время обработки не зависит от выбранного РЦ. Этот тип моделей считается самым простым, так как задача оперативно-производственного планирования может быть сведена к выбору первого доступного РЦ для каждой операции.

- Схожие параллельные РЦ. В данном случае РЦ выполняют работы за разное время, при постоянном соотношении для всех операций. Поэтому самый быстрый РЦ будет быстрее для каждой из операций. Для решения задачи

планирования, в частности для определения времени выполнения операции, для каждого РЦ вводится коэффициент скорости.

- Несвязанные параллельные РЦ. Это самый общий случай из трех. Предполагается, что РЦ отличаются друг от друга и каждый РЦ может работать по-разному в зависимости от поступающих работ. Время обработки операции зависит от РЦ, которому она назначена, при этом исходные данные представляют собой матрицу времени обработки для разных РЦ.

Следующим рассматриваемым примером является поточное производство. В поточном производстве есть некоторое количество рабочих центров, но они организованы последовательно. Предполагается, что каждый РЦ выполняет уникальную операцию технологического процесса. Каждая работа должна пройти через все РЦ в определенном порядке. [36] Следует обратить внимание на то, что технологическая операция, время и другие параметры операций для каждой работы на каждом РЦ, как правило, различны. Таким образом, оперативно-производственный план может быть представлен как последовательность выполнения работ для каждого РЦ. В большинстве случаев, однако, для простоты организации оперативно-производственного планирования и, в целом, управления поточным производством последовательность прохождения работ через РЦ является единой для всех работ.

Далее перейдем к рассмотрению так называемого рабочего цеха (англ. job shop). Подобно поточному производству, в данном примере есть некоторое количество РЦ. Основное отличие состоит в том, что каждая работа может иметь и чаще всего имеет различный маршрут обработки. Данный тип является самым распространенным в исследованиях как теоретических, так и практических по причине наиболее точного описания производственной организации машиностроительных предприятий. [54]

При обзоре литературы было обнаружено, что существует 16 моделей планирования рабочего цеха, которые могут быть классифицированы по различным критериям, таким как: источникам спроса на изделия, количеству РЦ, целевым функциям, характеристикам производственной среды, технологическим

характеристикам операций, вовлеченности нескольких производств в процесс изготовления и ограничениям ресурсов. [65]

Добавление дополнительных характеристик и ограничений в задачу, изменение структуры делает ее более сложной. Для переосмысления задачи планирования и понимания в широком смысле их сути и главных особенностей, модели рабочего цеха были классифицированы по четырем типам структур, а именно: базовая структура, структура с множеством РЦ, структура с множеством ресурсов и структура с множеством предприятий.

Базовая структура рабочего цеха является простейшей моделью среди остальных, большинство задач данного типа являются NP-сложными задачами. В данных моделях конкретная операция выполняется на конкретных РЦ и никакие другие РЦ не могут быть выбраны для выполнения операции. [62]

Гибкая структура рабочего цеха или структура с множеством РЦ является более сложной структурой, так как РЦ могут выполнять несколько или даже все операции производственного процесса.

Следующей рассматриваемой структурой является структура с множеством ресурсов. Производственная мощность предприятия может ограничиваться РЦ, инструментами, приспособлениями, операторами, механизмами, роботами и другими производственными ресурсами. [70] Особенность заключается в том, что РЦ может быть доступен для выполнения операции, но для оперативно-производственного планирования операция по-прежнему будет оставаться недоступной, так как один из необходимых ресурсов является ограничением. Система планирования должна назначать выполнение операций руководствуясь не только доступностью РЦ, но и всех необходимых производственных ресурсов. Соответственно, процесс оперативно-производственного планирования является более сложным и динамичным. Эту структуру можно рассматривать как расширение двух предыдущих. [60]

Следующим уровнем является структура с множеством предприятий, в которой к характеристикам структуры с множеством ресурсов добавляются условия, связанные с наличием нескольких производственных предприятий. Из-за

различных моделей управления ресурсами и динамических перепланировок трудно получить оптимальное решение для централизованного межзаводского планирования. Кроме того, модель должна быть более гибкой и адаптируемой, поскольку любые изменения могут повлиять на другие предприятия. Этот тип структуры в целом предполагает централизованную модель оперативно-производственного планирования, за исключением случаев, когда работы на одном из предприятий никак не влияют на другие предприятия, например, это могут быть коммерческие заказы.

Таким образом, представленная классификация задачи оперативно-производственного планирования рабочего цеха позволяет более точно создавать модели реальных производственных систем, учитывая сложности реальных производственных задач.

Последней крупной моделью является так называемая открытая линия (англ. open shop). Открытая линия является более общей и одной из наиболее сложных моделей. Условия схожи с предыдущими типами моделей. Существует множество РЦ и множество работ, которые должны быть обработаны на этих РЦ. Однако, технологический процесс изготовления для каждой работы не фиксируется, а определяется в процессе планирования. Иными словами, можно предположить, что маршрут изготовления является произвольным и операции над изделием могут выполняться в произвольном порядке на РЦ.

Как правило, на предприятиях машиностроения изготавливается важная техника. Процесс их изготовления крайне редко можно описать какой-то конкретной моделью из представленных, необходимы более общие планы, которые объединили бы в себе лучшее от каждой из модели. [12] Такие модели можно обозначить как гибридные. Вместо отдельных РЦ в гибридных моделях будут стадии изготовления, каждая из которых содержит подмножество РЦ, необходимых для выполнения данной стадии. Более конкретно, есть множество групп взаимозаменяемости РЦ. Количество РЦ в группе взаимозаменяемости может варьироваться.

Гибридные модели добавляют дополнительную размерность задаче – назначение РЦ в модели оперативно-производственного планирования, так как для каждой стадии необходимо принять решение о выборе РЦ.

Предыдущий список типов моделей не являются исчерпывающим. Их следует рассматривать как широкую классификацию, в рамках которой, при определенной степени абстракции, могут рассматриваться некоторые производственные предприятия. Некоторые другие прототипические среды можно кратко резюмировать следующим образом:

- Производственные ячейки. Представляют собой смесь высокой вариативности изготавливаемых изделий и ориентированного на массовый выпуск поточного производства. [55] Каждая ячейка производит один тип продукта или семейство продуктов. В большинстве случаев, РЦ в каждой ячейке управляются с помощью компьютеров и имеют высокую степень автоматизации и могут иметь роботизированные манипуляторы или автоматические системы перемещения ДСЕ между РЦ внутри ячейки. [57]

- Сборочный цех. В данных моделях предполагается, что перед тем, как приступить к сборке изделий, необходимо произвести все входящие детали и сборочные единицы, согласно спецификации на изделие. Поэтому выполнение некоторых работ должно быть завершено до начала сборки конечного изделия.

- Производственная линия. Лучшим примером производственной линии является производство автомобилей. Производственные линии часто называют сборочными линиями. Особенностью является то, что изделия двигаются вдоль конвейерных лент или других средств транспортировки. Операции выполняются над продуктами по мере их перемещения, так как между ними нет буфера. Часто, места на производственной линии, где выполняются операции, называются станциями. Сборочная линия не должна быть линейной. Он может иметь несколько фидерных линий в определенных точках. Сборочные конвейеры используются, например, для производства самолетов, автомобилей, техники и сельскохозяйственного оборудования. [76]

- Гибкие производственные системы. К данной категории можно отнести очень большое количество возможных вариантов. Они добавлены в данный список так как в других моделях РЦ более или менее фиксированы, и никакая гибкость недопустима как в краткосрочной, так и в среднесрочной перспективе. Гибкие производственные системы спроектированы так, что изготовление нового изделия или изменения в спецификациях на изделие легко выполнить без дополнительных затрат времени и других ресурсов. Гибкие системы обычно используются в производстве малых серий высоко персонализированных продуктов. [40]

Все примеры, рассмотренные выше, создают бесчисленное количество ситуаций, ограничений, характеристик и событий разной природы. Ниже приведен краткий список связанных с производством ограничений, которые могут быть у реальных проблем оперативно-производственного планирования:

- Работы могут быть как независимыми друг от друга, так и связаны (связь, представляющая собой структуру изделия).

- Постоянная доступность РЦ невозможна. Кроме экономических причин и технического обслуживания, могут случаться неожиданные поломки или другие отказы РЦ.

- Во многих случаях выполнение операции может быть прервано и возобновлено позднее.

- Подготовительно-заключительное время или время наладки существуют для большинства производственных операций.

- Буферы и складские помещения для хранения готовых деталей и незавершенного производства имеют ограниченную вместимость.

- Не все ДСЕ могут бесконечно ожидать между выполнением смежных операций. В качестве примера можно привести охлаждение ДСЕ, которые необходимо обрабатывать в горячем состоянии или ДСЕ, которые могут высохнуть или заржаветь за длительный период ожидания.

- Аналогично предыдущему пункту, может быть необходимо минимальное время ожидания между операциями, например если ДСЕ должно остыть.

- Предположение, что все данные известны заранее и что эти данные детерминированы, вероятно, будет неверным. В контролируемых средах и испытанных производственных системах время, необходимое для данной операции продукта, может быть известно и в значительной степени фиксировано. Однако характер некоторых производственных процессов является стохастическим, и время обработки (как и любые другие данные) может быть трудно оценить или может быть представлено в виде статистического распределения с известными параметрами. [24]

- Процесс управления производством очень динамичен. Это означает, что новые заказы поступают с течением времени, даты выпуска меняются, сроки выполнения могут быть переупорядочены клиентом, также может измениться приоритетность заказа. Любая производственная информация подобного рода, даже если она известна заранее, может измениться. [6]

- ДСЕ в работе, заготовки, комплектующие и материалы не перемещаются между РЦ мгновенно. Необходимо учитывать время транспортировки. В случаях крупных предприятий, внутрипроизводственная логистика должна рассматриваться как отдельная оптимизационная задача.

- Операции на РЦ выполняются или управляются рабочими, что имеет огромное влияние на многих уровнях. Это касается рабочего времени, перерывов, уровней квалификации, эффекта обучения и других факторов. Операция может быть выполнена как быстрее, если в ней участвует несколько человек, так и медленнее. Кроме того, один рабочий может обслуживать несколько РЦ и выполнять сразу несколько операций.

- Процесс производства не идеален. Иногда в процессе производства делают брак, который может быть восстановимым или нет. В соответствие с этим, могут возникать потребности в дополнительном запуске изделий в производство, добавлении операций на исправление брака.

- На сегодняшний день, благодаря глобализации, производства больше не являются изолированными элементами. Распределенное производство и сложные цепочки поставок также оказывают влияние на систему оперативно-

производственного планирования предприятий машиностроения. Число возможных ситуаций очень велико.

- Изготовление ДСЕ может иметь сложные процессы или даже альтернативные маршруты изготовления, которые в свою очередь могут изменять спецификацию, в зависимости от выбранного маршрута изготовления.

- Время выполнения операции может изменяться, даже если оно известно и нормировано. Назначение более квалифицированного рабочего, использование приспособлений или другого дополнительного ресурса может повлиять на время выполнения операции.

Таким образом, список влияющих на работу производства обстоятельств очень велик, и в данном списке были представлены основные ограничения, которые оказывают наибольшее воздействие как на работу производства, так и на систему оперативно-производственного планирования.

Как уже упоминалось ранее еще одним элементом, необходимым для построения модели оперативно-производственного планирования, является установление критерия (или целевой функции), используемого при решении такой задачи. Обычные критерии основаны на некоторых широких категориях, которые можно резюмировать следующим образом:

- Критерии, основанные на использовании. Эти критерии связаны с одним из имеющихся производственных ресурсов: максимизация использования РЦ, сокращение времени ожидания, сокращение количества переналадок, максимальное количество выполненных работ за единицу времени, и т. д.

- Удовлетворение заказчика. К ним относятся показатели эффективности, связанные с выполнением сроков отгрузки, или число работ, которые были завершены в срок, или минимизации числа срывов сроков изготовления и отгрузки.

- Критерии, ориентированные на хранение. В данном случае целевой функцией могут выступать: минимизация незавершенного производства, уменьшение складских запасов материалов и готовых изделий, уменьшение очереди между операциями.

- Критерии, ориентированные на затраты. Производство большими сериями обычно более экономично из-за эффекта экономии на масштабах. Данные критерии могут быть связаны с любыми из ранее упомянутых критериев, но в них акцент смещен на затраты, например минимизация стоимости хранения или минимизация штрафных санкций за срыв сроков изготовления.

- Критерии, связанные с бережливым производством, производством точно-в-срок и др. Производство точно-в-срок требует, чтобы работы были выполнены точно к установленным срокам, не раньше и не позднее. В бережливом производстве особое внимание уделяется сокращению отходов и минимизации операций, не добавляющих ценность. [4]

Большая часть литературы и исследований по планированию производства используют один критерий или целевую функцию, и данная целевая функция относится к типу минимизации. [40] Как и с производственными ограничениями, критерии оперативно-производственного планирования разнообразны и многочисленны. Представленный список – это краткое представление существующих критериев. Более подробно они будут рассмотрены, как и ограничения производства, в отдельном разделе.

Как уже отмечалось ранее, существует большое разнообразие производственных типов организации, ограничений, критериев в моделях оперативно-производственного планирования. Традиционным способом учета разнообразия моделей планирования является их классификация с использованием таксономии и системы обозначений, позволяющих установить сходства и различия между моделями. Далее будут представлены две наиболее популярные схемы классификации.

Первая классификация моделей планирования появилась в 1960-х годах в работе Конвея и др. [42] В данной схеме классификация моделей предполагается в соответствии с их основными характеристиками. Конвей предложил обозначение из четырех символов A/B/C/D, где каждый из символов имеет более или менее точное значение:

- А – указывает количество работ, которые должны быть запланированы в данной задаче.

- В – указывает количество РЦ.

- С – описывает схему организации производства. $C = 1$, если это один РЦ; $C = P$, если несколько параллельных РЦ; $C = F$, если это поточное производство; $C = J$, если это рабочий цех; $C = O$, если это открытая линия.

- D – служит для указания целевой функции.

Нетрудно заметить, что данная классификация является неполной. Например, нет различий между тремя типами параллельных РЦ. Кроме того, производственные ограничения также не учитываются в классификации. По всем этим причинам, в начале 1970-х годов была представлена более детализированная схема классификации.

Разработки более совершенной схемы основывались на классификации Конвея, Ринной Кан был одним из первых, кто предложил [86] изменить буквенное обозначение классификации на три символа $\alpha / \beta / \gamma$. Данная схема в дальнейшем была расширена и дополнена в работах Грамма и др. [51], Блазевича и др. [37], Лоулера и др. [67] На основе названных работ далее будут представлены наиболее важные аспекты данной классификации.

Первый символ – α обозначает схему организации производства. Он далее разделяется на 4 части $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, :$

- $\alpha_1 = 1$ или \emptyset – один РЦ;
- $= P$ – одинаковые параллельные РЦ;
- $= Q$ – схожие параллельные РЦ;
- $= R$ – несвязанные параллельные РЦ;
- $= F$ – поточное производство;
- $= J$ – рабочий цех;
- $= O$ – открытая линия;
- $\alpha_2 = 1, 2, \dots, m$ – фиксированное количество РЦ;

Второй символ – β обозначает производственные ограничения. Далее он разделяется на столько частей, сколько ограничений предусмотрено в

исследуемой задаче, при этом ограничения разделяются запятыми. Детальный разбор будет осуществлен в следующих разделах.

Третий символ – γ обозначает целевую функцию. Детальный разбор будет в также осуществлен в дальнейшем.

Таким образом, в данном разделе был представлен базовый концепт моделирования как необходимого элемента для решения задачи оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия. Также рассмотрены основные характеристики моделей, типы моделей, наиболее распространенные ошибки при моделировании. Далее приведены определения для моделей оперативно-производственного планирования, особое внимание уделено рассмотрению схем организации производства. Главные производственные ограничения и целевые функции оперативно-производственного планирования также рассмотрены в данном разделе, однако они будут более детально рассмотрены в следующих двух разделах. Кроме того, рассмотрены схемы классификации моделей оперативно-производственного планирования.

2.1.1. Ограничения моделей оперативно-производственного планирования

В данном разделе будут более детально рассмотрены вопросы, касающиеся ограничений моделей оперативно-производственного планирования машиностроительных предприятий. В предыдущих разделах было установлено, что оперативно-производственное планирование подвержено большому спектру ограничений. В соответствии с ранее представленной классификацией моделей в данном разделе будет использоваться обозначение ограничений символом β .

С целью создать согласованное видение сферы ограничений планирования, в данном разделе многие из них будут упрощены и все ограничения будут разделены на ограничения, связанные с процессом, операциями, транспортировками, хранением. Несмотря на это условное разделение, следует обратить внимание, что ограничения редко независимы друг от друга. Наконец, некоторые

ограничения имеют смысл только в определенных производственных моделях и при определенных критериях оптимизации.

Первой рассматриваемой группой будут ограничения, связанные с процессом. Под ними подразумеваются все ситуации, которые делают процесс производства нестандартным в условиях различных схем организации производства.

Ограничение последовательности изготовления нарушает общее предположение о том, что все работы, которые должны быть запланированы и обработаны на РЦ, независимы. Намного чаще в реальных условиях фактические изделия состоят из большого количества ДСЕ.

Ограничение последовательности изготовления в простейшей форме определяет, что первая работа или операция работы не может быть начата до завершения всех предшествующих операций или изготовления всех входящих ДСЕ, обозначается как $\beta = \text{rрес}$. Данное ограничение не настолько очевидно, как может показаться. На первый взгляд, их наличие сильно упрощает модель планирования, однако, достаточно давно было доказано [68], что данное ограничение усложняет простые задачи. Ограничение последовательности изготовления также может означать более сложные ситуации, в которых операции должны быть начаты или закончены одновременно.

Действия, выполняемые на РЦ, не связанные непосредственно с обработкой изделий обычно называют подготовительно-заключительным временем (ПЗ) или переналадками. Данные операции могут включать настройку РЦ, смену инструмента, очистку, проверку, установку или снятие ДСЕ и т.д. Очевидно, что переналадки являются достаточно широким понятием и включают намного больше различных действий, которые, однако, не являются основным направлением исследования в данной работе. Тем не менее, так как возможны различные варианты влияния на модели планирования следует рассмотреть их основные отличительные особенности. Время ПЗ может быть независимым или зависимым от последовательности выполнения работ. ПЗ считается зависимым, если на его продолжительность влияет не только выполняемая работа, но также предыдущая

и последующая работа. ПЗ может быть минимальным для ДСЕ схожих по некоторым параметрам.

С уверенностью можно утверждать, что большинство производственных систем учитывают, тем или иным образом, время ПЗ. В некоторых случаях, время переналадок может быть относительно небольшим и рассматриваться как незначительное или быть включено во время обработки, если оно не зависит от последовательности изготовления и РЦ.

Ранее в данной работе упоминалось утверждение, что РЦ доступны постоянно на всем горизонте планирования. Это допущение очень удобно и, одновременно с этим, очень далеко от реальности. РЦ подлежат ремонтам, профилактическому обслуживанию, к тому же производство обычно работает не 24 часа 7 дней в неделю, а сменами. Следовательно, РЦ не всегда доступны и этот фактор следует учитывать в моделях. Одним из вариантов, когда интервалы доступности РЦ известны заранее, является создание расписания интервалов доступности РЦ.

Интересная ситуация возникает, когда на РЦ не допускаются простои. Это ограничение моделирует важную практическую ситуацию, которая возникает, при использовании дорогостоящего оборудования. Простои на дорогостоящем оборудовании нежелательны или даже невозможны по технологическим ограничениям. Другим примером могут быть РЦ, где нельзя легко остановить или перезапустить процесс производства как по технологическим, так и по экономическим соображениям. Кроме того, простои также нежелательны на РЦ, которые являются узкими местами в производстве. [43] В исследованиях ограничение, связанное с простоями представлено недостаточно широко, и исследователям еще предстоит проделать большой объем работы в данной области, поскольку рассмотрение этого ограничения может принести пользу более сложным производственным системам. Данное ограничение обозначается как $\beta = \text{no-idle}$.

Поступающие на РЦ работы могут быть сгруппированы в партии, а после этого РЦ начнет их обработку одновременно. Объединение работ в партии экономически оправданно в том случае, если поступающие ДСЕ изготавливаются

по одному технологическому процессу и, соответственно, требуют одинаковой настройки РЦ. Как правило, рассматривается два типа партий: p – партия, когда время обработки всей партии считается равным наибольшему времени обработки любого ДСЕ в партии; s – партия, когда время обработки равно времени обработки всех ДСЕ в партии. Кроме того, b обозначает размер партии или максимальное число ДСЕ, которые могут быть в партии. Если размер партии может меняться для разных РЦ, в обозначении используют b .

Далее перейдем к рассмотрению ограничений, связанных непосредственно с операциями. Вопрос с прерыванием выполнения операций уже обсуждался ранее. Если принято, что после начала выполнения операции на РЦ ее нельзя прерывать и изготовление должно быть завершено, тогда прерывания не разрешены. Существует большое количество ситуаций, когда прерывание возможно или даже необходимо:

- Появление нового, более приоритетного заказа.
- Может быть экономически выгодно приостановить работу сейчас и продолжить ее на другом РЦ или позднее.
- Неожиданная отмена заказа или нарушение договоренности с заказчиком может потребовать остановки изготовления всех ДСЕ по данному заказу.
- Выход из строя РЦ или другие неожиданные события могут привести к прерыванию выполнения операции.

У прерывания операций могут быть разные последствия. Возможны ситуации, когда после прерывания операции ее нужно будет начинать сначала. Время переналадки также может быть прерываемым, например, если принято решение изменить приоритет изготавливаемых на РЦ ДСЕ. Для большого количества ситуаций, прерванные операции или переналадки могут быть продолжены без дополнительных затрат, но возможны и ситуации, когда возобновление работы может потребовать дополнительных затрат времени или ресурсов. Прерывание операции может быть возможно только один раз, ограниченное количество раз и неограниченное. Прерывание одной операции ДСЕ может привести к необходимости начинать изготовление этого ДСЕ сначала. Возможных сценариев

существует бесчисленное множество, однако не все они сильно усложняют задачу. Иногда прерывания операций происходит из-за того, что закончилась рабочая смена и выполнение этой операции возобновится на этом же РЦ в следующую рабочую смену. Данное ограничение обозначается как $\beta = pmtn$.

Как правило, следующая операция технологического процесса может быть начата, только если предыдущая операция полностью завершена. Однако, если следующий РЦ занят, то деталь в виде полуфабриката или незавершенного производства ожидает в определенном месте завершения операции на РЦ. Существует множество ситуаций, когда ожидание недопустимо по технологическому процессу. Построение плана без ожиданий не является тривиальной задачей. Если РЦ, необходимый для операции, занят, необходимо вернуться к предыдущим операциям и отложить их запуск. Данное ограничение обозначается как $\beta = nwt$.

Другая ситуация, которая часто встречается на практике – операция не может начаться, как только предыдущая операция над этим же ДСЕ завершена. Как правило, ДСЕ должно быть каким-то образом перемещено к следующему РЦ. Существует множество способов транспортировки: конвейерные ленты, роботизированные производственные ячейки, роботизированные манипуляторы, другие управляемые транспортные средства, ручное перемещение и т.д. Наряду с этим разнообразием существует множество различных транспортных ограничений. Их можно условно разделить на два типа: связанные со временем перемещения, связанные с количеством транспортных средств.

Последними из важных ограничений является ограничения, связанные с хранением. Весь объем незавершенного производства должен храниться на производственных площадях, размеры которых ограничены. В идеале, если складские мощности, отведенные под конкретный тип ДСЕ, полностью заполнены, изготовление данного типа ДСЕ должно быть приостановлено, в то время как последующие стадии изготовления, где используется этот тип ДСЕ, должны начаться, чтобы освободить некоторое пространство на складе.

Также можно упомянуть необходимость учитывать емкость буфера между двумя последовательными операциями одной работы или ДСЕ. Часто в задачах оперативно-производственного планирования предполагаются неограниченный размер буфера, однако в реальности размер буфера может быть ограничен.

Таким образом, в данном разделе представлены основные ограничения, которые могут возникать в производственной среде. В данной работе выделены группы ограничений, связанные с процессом, с операциями, с транспортировками и с хранением. При разработке модели важно учитывать наиболее значимые для производственной системы ограничения, не стоит пытаться учесть все возможные ситуации, так как это очень сильно усложнит задачу и поиск методов ее решения.

2.1.2. Целевые функции моделей оперативно-производственного планирования

В данном разделе будет рассмотрен последний элемент, связанный с моделями планирования – целевые функции задач планирования. Как уже обсуждалось ранее, оперативно-производственное планирование является частью более крупного процесса – управления производством и, как следствие, цели планирования должны быть согласованы с целями, касающимися других решений в управлении производством. Поэтому в данном разделе будет представлен анализ выбора целевых функций, рассматриваемых с точки зрения управления производством. Затем будет представлена наиболее распространенная целевая функция моделей оперативно-производственного планирования.

Как известно из теории принятия решений, количественные целевые функции предполагают, что лицо, принимающее решение, хочет определить экстремальные значения решения (максимум, минимум) или решения, которые достигают фиксированных и предопределенных значений целевой функции, или интервалы значений целевой функции, которые могут быть ограничены с обеих сторон или только с одной. В управлении производством (и, следовательно, в

оперативно-производственном планировании) цели часто классифицируются по категориям затрат (иногда прибыли), времени и качества.

Поскольку решения по планированию находятся на оперативном, очень краткосрочном, временном горизонте многоуровневой системы планирования и управления производством, целевые функции затрат редко рассматриваются в качестве целевых функций в моделях планирования. Вместо этого предполагается, что на данном уровне планирования наилучшим вариантом являются целевые функции времени. [75] Временные параметры могут относиться к РЦ, параметрам ресурсов или работ. Категория «качество» в моделях оперативно-производственного планирования также обычно рассматривается исключительно в рамках временных показателей, т. е. по показателям уровня обслуживания, по этой причине они не будут рассматриваться в данной работе.

Целевые функции, используемые в моделях производственного планирования, связаны с оптимизацией некоторых показателей работы производства. Наибольший интерес у исследователей представляет целевая функция минимизации общей продолжительности выполнения всех работ. [40] Целевая функция обозначается как C_{\max} . Ее можно рассматривать как время, необходимое для завершения всего производственного плана, так как продолжительность измеряется с момента начала первой операции первого ДСЕ (обычно это считается моментом времени равного нулю, если не задано время на отоваривание или другие ограничения) до момента завершения последней операции последней ДСЕ.

Таким образом, в данном разделе рассмотрен процесс выбора целевой функции с точки зрения управления производством. Наилучшим вариантом и наиболее распространенным в задачах оперативно-производственного планирования являются цели, связанные с временем. Как упоминалось ранее, целевые функции могут быть основаны на использовании какого-либо ресурса, на удовлетворении требований заказчика, на хранении, на транспортировках и критериях связанных с современными методологиями управления производством, такими как бережливое производство и др. Многообразие возможных целевых функций велико, но большинство из них интересны только для определенных

производственных систем. Кроме того, возможны комбинации целевых функций и переход задач к многокритериальной оптимизации.

В долгосрочной перспективе наилучшей целевой функцией является та, которая оправдала доверие к себе. Такое доверие формируется после реализации нескольких оперативно-производственных планов, для которых производственный процесс проходил, как и ожидалось или даже лучше.

2.1.3. Построение модели оперативно-производственного планирования

После определения основных элементов, входящих в модель оперативно-производственного планирования, в данном разделе будет представлен процесс фактического построения модели. Модели оперативно-производственного планирования производства предназначены для упрощения и отображения соответствующих реальных производственных проблем. Далее данная модель используется для получения допустимых решений с помощью соответствующих методов, и затем полученное решение переносится и реализуется в реальных условиях.

Математические (т.е. формальные) модели представляют собой комбинацию логических зависимостей, математических отношений, таких как уравнения и неравенства, структуры данных и целевой функции. [30] Качество ответов на вопросы реальных задач оперативно-производственного планирования зависит от точности структуры и данных модели.

Ранее был рассмотрен процесс принятия управленческих решений, в котором началом является наличие реальной проблемы оперативно-производственного планирования, для которой нужно найти решение. Затем начитается построение модели путем упрощения и формализации.

Построение модели для задачи оперативно-производственного планирования требует наличия некоторого адекватного уровня допущений об ограничениях, целях, задачах и логических связях и их передачи в формальную сферу. Также на адекватном уровне и четко должны быть определены параметры и переменные модели. «Адекватность», в данном контексте, означает, что, во-

первых, все аспекты реальной проблемы представлены в модели достаточно корректно, во-вторых, модель должна легко поддаваться обработке. На основе этого можно сделать вывод, что аспекты сложности имеют важное значение при построении модели.

В соответствии с ранее представленной классификацией сложности следует отметить, что сложность, связанная с моделированием задач оперативно-производственного планирования, может быть массового и хаотического аспектов. В качестве примером можно привести:

- количество и разнообразность операций и работ;
- количество и разнообразность ресурсов;
- количество и разнообразность целевых функций;
- количество и разнообразность возможных решений и переменных;
- тип, количество и разнообразность взаимодействий между операциями, ресурсами, целевыми функциями.

Общим подходом к управлению аспектами сложности можно назвать абстрагирование (включая исключение соответствующих аспектов из модели) и упрощение (включая декомпозицию, агрегирование/деагрегирование). Рассмотренные аспекты построения моделей относятся к формальной и реальной сфере.

Существует несколько подходов к описанию формальных моделей, основанных на разных методах. К этим подходам относятся линейное программирование, целочисленное программирование, смешанное целочисленное программирование, агентное моделирование, вероятностные методы, «нечеткая логика» и сети Петри. [12]

Прежде чем углубляться в детали, следует отметить, что для моделирования некоторых типов проблем возможно использовать стандартные подходы. Данные типы моделей могут полностью удовлетворять потребности оперативно-производственного планирования или быть начальной итерацией при рассмотрении новых проблем. На рис. 2.1 представлены некоторые критерии моделей.

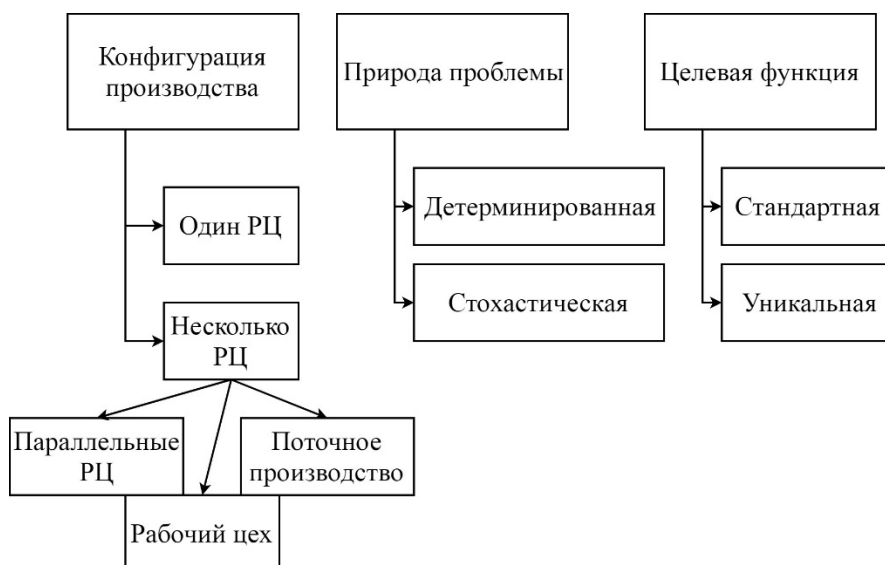


Рис. 2.1 Схема выбора параметров модели оперативно-производственного планирования

Цель модели производственного планирования состоит в том, чтобы создать допустимый план, т. е. осуществимый, качественный, эффективный, или даже оптимальный план назначения операций во времени. Оперативно-производственные планы можно охарактеризовать через операции, работы, РЦ, ресурсы, ограничения, цели и по другим специфическим характеристикам.

Как уже упоминалось ранее, основным элементом каждой задачи оперативно-производственного планирования является операция. В простейшей задаче одна операция одной работы назначается на один рабочий центр.

С точки зрения доступности ресурсов, каждая операция должна учитывать доступность РЦ, на который она назначена, т.е. ограничения должны гарантировать, что только ограниченное количество операций (обычно максимум одна) выполняется одновременно на соответствующем РЦ. В более сложных моделях у операции также могут учитываться ограничения, связанные с дополнительными ресурсами такими как инструмент, исполнитель, приспособления и т.д.

Касательно доступности работ или операций, стоит отметить необходимость учета ограничений, касающихся последовательности изготовления. Это означает, что, сборка изделия не может быть начата, если все входящие ДСЕ не

изготовлены или последняя операция работы не может быть выполнена, если не выполнены предыдущие.

Множество других аспектов, встречающихся в реальных условиях, могут быть включены в модель оперативно-производственного планирования. Приведем далее несколько примеров:

- предсказуемые и непредсказуемые периоды недоступности РЦ и ресурсов;
- прерывания работ;
- транспортировки между операциями, количество и вместимость транспортных средств;
- альтернативные технологические процессы изготовления;

В заключении этого раздела хотелось бы отметить, что помимо вышеупомянутых аспектов моделей, сам процесс моделирования должен осуществляться с учетом некоторых важных моментов. Во-первых, модель должна быть понятной для любого человека, понимающего принципы построения моделей. Во-вторых, модель должна не только должна быть применима для построения решений, но также должна иметь возможность быть дополненной при изменении условий реального производства. В-третьих, каждое дополнительное ограничение усложняет модель с точки зрения вычислительной сложности, следовательно, при построении модели необходимо руководствоваться правилом достаточного минимума. В-четвертых, качество решения задачи оперативно-производственного планирования зависит как от модели, так и от метода решения. Эти два раздела системы оперативно-производственного планирования сильно взаимосвязаны и, поэтому, должны рассматриваться вместе.

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении модели оперативно-производственного планирования необходимо определить наилучший подход, выбрать целевую функцию, соответствующую требованиям реальной задачи, и обозначить все необходимые ограничения, при этом обеспечивая простоту построения модели и руководствуясь правилом достаточного минимума.

2.2. Методы решения задач оперативно-производственного планирования

Данный раздел посвящен рассмотрению методов нахождения решений для моделей оперативно-производственного планирования. В данном разделе будут рассмотрены основные понятия, вопрос допущений при определении методов планирования, основные методы решения задач оперативно-производственного планирования, а также будет разработана классификация методов планирования.

Методом решения задачи оперативно-производственного планирования можно назвать формальную процедуру, которую можно применить к модели, для получения допустимого плана, показывающего наилучшие значения целевой функции. Поскольку процедура должна быть формальной, ее необходимо описывать с помощью конечного числа простых шагов, и поэтому она поддается кодированию и в конечном итоге выполняется компьютером. Техническое название такой конечной процедуры – алгоритм. [39]

Существует несколько явных и неявных допущений в определении методов планирования, которые важно отметить:

- Качественная модель планирования. Как упоминалось ранее, реальные проблемы оперативно-производственного планирования трудно поддаются точному описанию. Возможна ситуация, когда на момент построения модели лицу, принимающему решение, известны не все условия и ограничения, хотя они могут оказывать сильное влияние в реальных производственных условиях.

- Формальная модель. Предполагается, что задача представляется в виде математически строго сформулированной модели. Однако, модели всегда представляют собой в определенной степени упрощение реальной проблемы. Таким образом, получение решения для математической модели может означать только получение приблизительного решения для соответствующей реальной проблемы. Можно сделать предположение, что в отношении реальной проблемы не будет точной формулировки, точной процедуры решения и, соответственно, точного решения.

- Цели. Как правило, формальная модель предназначена для получения наилучшего возможного решения задачи оперативно-производственного планирования. Однако существует много других возможных типов целей, например:

1. Создание допустимого решения. Особенно актуально, если набор ограничений явно не предполагает нахождения допустимых решений.

2. Создание хорошего (квазиоптимального) решения, то есть решения, являющегося достаточно близким к оптимальному или не хуже некоторого заданного значения целевой функции.

3. Количество решений. В моделях оперативно-производственного планирования часто встречаются ситуации, когда существует более одного хорошего решения, т.е. одно и то же значение целевой функции достигается более чем одним решением. Большинство процедур получают только одно решение, но может потребоваться определить несколько или даже все возможные варианты.

- Детерминированная процедура. Метод можно назвать детерминированным, если он может решать формальную оптимизационную проблему за конечное количество шагов и его результат воспроизводим при повторном решении данной проблемы.

Предположим, что имеется точно сформулированная проблема оперативно-производственного планирования с определенной целевой функцией (например, общая продолжительность изготовления), которая должна быть минимизирована, с помощью точной процедуры должно быть определено одно оптимальное решение. После установки предположений возникает естественный вопрос: почему чаще используются приближенные алгоритмы (без гарантии оптимальности), несмотря на наличие точных. Ответ заключается в вычислительной сложности большинства моделей планирования. Приближенные алгоритмы довольно часто являются единственной подходящей альтернативой, учитывая время, которое необходимо точным методам для решения задачи.

Большинство задач оперативно-производственного планирования относятся к классу NP-сложных. Если задача относится к NP-сложным, то заранее известно, что оптимальное решение для задач большой размерности вряд ли

может быть построено за приемлемое время. Для уменьшения вычислительной сложности можно попробовать уменьшить сложность модели или алгоритма до приемлемого уровня.

Алгоритмы решения задач оперативно-производственного планирования можно подразделить на точные и приближенные. Точные алгоритмы гарантируют, что ни одно другое решение по заданной целевой функции не будет лучше, чем полученное. Приближенные алгоритмы такой гарантии не дают. Точные алгоритмы включают в себя: алгоритмы, основанные на эффективных правилах, алгоритмы математического программирования, метод ветвей и границ. К приближенным относятся четыре крупные группы алгоритмов: конструктивные, локального поиска, метаэвристические, алгоритмы искусственного интеллекта. Общая схема классификации представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Классификация алгоритмов оперативно-производственного планирования

2.2.1. Точные алгоритмы

Математическое программирование и исследование операций применяются для поиска оптимальных решений с 1950-х годов. [42]

Алгоритмы, основанные на эффективных правилах – это первые подходы, которые использовались в данной области. В соответствии с исходными данными, может быть установлен ряд предварительных правил, которые точно определяют порядок обработки. Такие методы дают точное оптимальное решение. Одними из наиболее известных является набор правил Джонсона, который решает задачу с двумя РЦ. [59] Разработки отечественных ученых С.А. Соколицына, А.Н. Климова, И. Д. Оленева [10] и В.А. Петрова [23] с практической точки зрения показывали лучшую результативность, и их алгоритмы были проще для использования.

Вагнер в своей работе [91] обозначил, что методы математического программирования могут быть использованы для нахождения оптимального решения задачи оперативно-производственного планирования. Однако исследователь также обнаружили, что методы математического программирования имеют значительный недостаток – чрезмерно большое вычислительное время, необходимого для нахождения оптимума или получение решений низкого качества. Хефец и Адири [52] рассмотрели алгоритм для решения задачи с двумя рабочими центрами, в котором каждая операция выполняется со временем обработки равным единице. Все вышеперечисленные задачи являются уникальными оптимизационными проблемами и могут быть решены за полиномиальное время с помощью разработанных алгоритмов, основанных на эффективных правилах.

Манне использовал подход, объединивший в себе дискретное целочисленное и линейное программирование, и предложил единую форму математической формулировки, которая включала линейную целевую функцию, ряд линейных ограничений и двоичные целочисленные переменные. [72] Эта формулировка включала значительно меньшее количество переменных и вычислялась эффективнее, чем модель Вагнера.

Многие задачи оперативно-производственного планирования могут быть сформулированы как задачи целочисленного, линейного или нелинейного программирования. Использование данного подхода состоит, в основном, из двух шагов: формирование рассматриваемой модели в терминах смешанного

целочисленного линейного программирования и затем использование программных продуктов для решения сформированной модели (самым распространенным программным продуктом является поиск решений в Microsoft Excel).

Далее рассмотрим метод ветвей и границ, который тоже относится к точным алгоритмам решения. Метод ветвей и границ один из самых распространенных подходов для решения дискретных и комбинаторных оптимизационных задач. Данный метод можно назвать улучшением решения полным перебором всех возможных вариантов, так как в нем все подмножества решений отсеиваются, если не содержат оптимальных решений. [71] Метод ветвей и границ был предложен Лендом и Дойгом для решения задачи целочисленного программирования. [66]

Точные алгоритмы решения задач оперативно-производственного планирования могут обеспечить оптимальное решение за полиномиальное время для определенных задач. Главным их недостатком является то, что задачи должны быть мелкомасштабными. В качестве лучшего точного метода с точки зрения применения для решения реальных производственных задач планирования можно выделить метод ветвей и границ, однако использование этого метода достаточно сложно организовать из-за сложности построения деревьев, описывающих все возможные варианты, и других аспектов реальных задач оперативно-производственного планирования, которые рассматривались ранее.

Таким образом, для крупномасштабных проблем использование точных алгоритмов решения затруднено из-за высокой вычислительной сложности и невозможности завершения расчетов за разумное время. Однако для производственных систем с децентрализованным планированием и / или несложными производственными процессами, другими словами, с задачами малого размера, использование точных алгоритмов будет наилучшим вариантом, так как результаты всегда будут оптимальными. [90]

2.2.2. Приблизительные алгоритмы

С непрерывным развитием компьютерных технологий и интеллектуальных алгоритмов методы исследования, связанные с задачами планирования производства, постепенно преобразовались из методов точной оптимизации в методы аппроксимации. Приближенный алгоритм можно определить как процедуру, дающую решение рассматриваемой задачи оптимизации с определенной степенью точности. Такие алгоритмы применяются, если точного алгоритма решения нет или его использование затруднено, т.е. требует больших затрат времени.

Существует широкий спектр приближенных алгоритмов, которые могут решать NP-трудные задачи оперативно-производственного планирования. Широки также идеи и концепции, на которых основываются алгоритмы, так что классифицировать данные методы можно разными способами. В данной работе представлена классификация, определяющая четыре группы алгоритмов: конструктивные, искусственного интеллекта, локального поиска и метаэвристические.

Конструктивные алгоритмы могут быстро найти решение. Наиболее распространенные конструктивные алгоритмы: правил приоритетов, вставки, эвристики узких мест.

Алгоритм правил приоритетов – это построение решения на основе использования некоторых правил для назначения операций на РЦ. Такие правила называются, соответственно, правилами приоритетов. Алгоритмы, построенные с применением правил приоритетов, как правило, ведут список доступных или ожидающих задач, например, маршрутных карт изготовления ДСЕ. Задачи попадают в список каждый раз, когда появляется фактическая возможность начать работу с ними. Правила приоритетов выполняют прямой расчет для всего множества задач по соответствующему правилу и устанавливают их в оперативно-производственный план.

Правил приоритетов существует достаточно большое количество, они хорошо освещены в литературе, поэтому представим очень коротко только наиболее значимые и часто применяемые из них [19]:

- FCFS («first come, first served» – первый поступил, первый обработан) – работы выполняются в порядке, в котором они попадают на РЦ.

- SPT («shortest processing time» – кратчайшее время обработки) – сначала обрабатываются работы с наименьшим временем выполнения.

- EDD («earliest due date» – наиболее ранний срок выполнения) – сначала выполняется работа с самым ранним сроком выполнения.

- CR («Critical ratio» – критическое отношение) – индекс приоритета рассчитывается как отношение оставшегося времени к оставшейся работе. Отношение менее 1 означает, что работа задерживается. Сначала обрабатывается работа с самым низким соотношением.

- LWR («Least work remaining» – наименьшее количество оставшейся работы) – правило, основанное на определении всего времени обработки, оставшегося до завершения работы.

- FOR («Fewest operations remaining» – наименьшее количество операций) – правило основано на количестве оставшихся операций.

- NQ («Next queue» – дальше по порядку) – очереди перед РЦ измеряются (в часах или количестве рабочих мест). Сначала обрабатывается работа, которая отправляется в самую маленькую очередь.

- LS («Least setup» – наименьшее время наладки) – сначала обрабатывается задание с наименьшим временем наладки.

Общие свойства правил приоритетов различны. SPT и его вариации LWR и FOR уменьшают размер незавершенного производства, среднее время завершения работ, но могут увеличивать простаивание РЦ с трудоемкими операциями, что может привести к срыву сроков. EDD уменьшает запаздывание сроков выполнения работ, но увеличивает среднее время нахождения работы в производстве. NQ и LSU максимизируют эффективность использования РЦ. Кроме

того, существует множество других правил приоритетов и возможных их комбинаций.

В настоящее время также проводятся исследования правил приоритетов. Ингимундардоттир и Рунарссон представили обучаемые правила линейных приоритетов, в которых линейная классификация использовалась в системе правил приоритетов для определения лучшего варианта из простых правил с помощью контролируемого подхода к обучению модели. Экспериментальные исследования показали, что результат получается лучше, чем использование общих правил приоритетов. [56] Захмани и др. построили имитационную модель для оптимизации расписания, использовали разные правила приоритетов для каждого РЦ, чтобы выбрать лучшее правило для каждой новой задачи планирования и, наконец, продемонстрировали преимущества использования нескольких правил. [94] Паул и др. адаптировали метод индекса выбора предпочтений для ранжирования приоритетных правил для планирования работы сборочного производства. [79]

Основным недостатком правил приоритетов является их внутренняя недальновидность. Кроме того, правила приоритетов зачастую разрабатываются с учетом конкретной цели и отдают предпочтение конкретным показателям эффективности. Тем не менее, применение правил приоритетов широко распространено по причине того, что они могут быть использованы с большинством моделей оперативно-производственного планирования с незначительными модификациями. Учитывая, что продвинутые подходы достаточно медленно набирают популярность на предприятиях машиностроения, становится очевидно, что использование правил приоритетов может быть достойным методом решения задачи оперативно-производственного планирования.

Алгоритм вставки был разработан Розенкранцем и др. для решения проблемы коммивояжера. [87] Вставка операций или заданий в частичные графики по одному обычно может показать лучшие результаты, чем правила приоритетов. Наваз и др. использовали алгоритм вставки для решения задачи поточного производства. [78]

Изменяя правило выбора элемента для следующей вставки, особенно комбинируя алгоритм вставки с лучевым поиском или рассматривая вставки разных заказов, Вернер и Винклер применили алгоритм для решения задачи планирования и получили улучшение результатов целевой функции. [92] Лиан и Месгхони предложили улучшенный алгоритм вставки, в котором, во-первых, предварительный график был получен с помощью эвристического алгоритма, а затем задачи обслуживания были вставлены в схему перед расписанием для реализации динамического планирования. [69]

Алгоритмы эвристики на основе узких мест, такие как «Сдвиг узкого места» и «Поиск бинов», представляют собой более сложные подходы к балансировке качества результатов и трудоемкости. Рассмотрим более подробно алгоритм меняющихся «узких мест». Основная идея заключается в следующем: необходимо зафиксировать один РЦ как «узкое место» рассматриваемой производственной системы. [5] Затем для данного РЦ и для каждой работы вычисляется, какие операции должны быть выполнены прежде, чем работа попадет на обработку на «узкое место», т. е. все предыдущие операции работ на других РЦ. [38] В результате получается массив данных с информацией о том, когда каждая работа может быть начата на «узком месте». Поскольку «узкое место» системы обычно не идентифицируется заранее и может меняться от задачи к задаче, описанный выше подход применяется для всех РЦ, с фиксацией последовательности работ на тех РЦ, которые уже были рассмотрены. [32]

Конструктивные алгоритмы, такие как правила приоритетов, алгоритмы вставки и эвристика «узких мест», иногда могут получать решения задач оперативно-производственного планирования очень быстро, но также возможны ситуации с созданием недопустимых решений, особенно когда задача достаточно сложная. Для повышения качества решений, как правило, необходимо разрабатывать сложные эвристики. Для сложных производственных систем существует множество ограничений, правил и особенностей, которые взаимосвязаны или могут противоречить друг другу. Таким образом, трудно построить приемлемый алгоритм, отвечающий всем требованиям системы. Следует отметить, что

иногда, особенно для сложных и многоуровневых производственных структур, пользуются правилом «чем сложнее система, тем проще должно быть ее планирование». [80] В таких случаях высокая скорость решения, которую могут обеспечить данные алгоритмы, может быть очень привлекательна для их использования.

Летом 1956 года группа выдающихся молодых ученых объединилась, чтобы обсудить ряд проблем, связанных с имитацией интеллекта человека компьютерами, и впервые предложили термин «искусственный интеллект». Данное событие считается началом развития дисциплины «искусственного интеллекта» (ИИ). ИИ – это единое название, связанное с областью науки, посвященной разработке программ, которые пытаются воспроизвести человеческий интеллект. [47]

Алгоритмы удовлетворения ограничений нацелены на изучение и уменьшение эффективного размера пространства поиска решений. Это происходит путем аппроксимации ограничений для определения всего порядка и последовательности путем выбора переменных и распределения возможных значений, которые называются эвристикой переменных и величин. Хотя они принадлежат к области ИИ, многие методы удовлетворения ограничений для задач планирования применяют систематический поиск по дереву и сопровождаются алгоритмами ветвей и границ.

Нейронные сети могут быть использованы для решения задач оперативно-производственного планирования, однако в работе [46] их применение для решения реальной задачи оказалось затруднено. Большое количество переменных, которые необходимо учитывать привело к низкой вычислительной эффективности и сложности в достижении решений хорошего качества.

Экспертные и научно-обоснованные методы состоят из базы знаний и механизма рассуждения. База знаний включает в себя ряд правил, процессов и эвристик. Механизм рассуждения используется для выбора стратегии работы со знаниями в базе знаний. Наиболее известные экспертные системы: ISIS, MPECVD, OPIS, SONIA. [60, 88]

Алгоритмы удовлетворения ограничений, нейронные сети, экспертные методы и научно-обоснованные методы являются алгоритмами, относящимися к области «искусственного интеллекта». Все эти алгоритмы широко распространены из-за их способностей к нелинейному преобразованию, самообучению, обучению на ошибках и способностям к прогнозированию. Однако у данных алгоритмов есть и множество недостатков, таких как неудовлетворительное обучение, приближение и обобщение, несогласованность и принятие решений без научных правил.

Алгоритмы локального поиска обычно состоят из конечного набора решений, оптимизированной функции или набора оптимизированных функций и стратегии поиска. Основные алгоритмы локального поиска включают: жадные эвристики [41], итеративное улучшение, пороговое принятие, оптимизацию «большого шага» и имитационный отжиг. [58] Самым распространенным алгоритмом локального поиска является алгоритм имитационного отжига.

Алгоритм имитации отжига является алгоритмом случайного локального поиска, а также метаэвристикой. Его работа похожа на процесс физического нагревания тела, например отжига металлов. Процесс предполагает постепенное уменьшение температуры и переходы атомов из одной ячейки кристаллической решетки в другую с определенной вероятностью. [93]

Сравнение алгоритмов локального поиска показывает, что данный класс алгоритмов может находить оптимальные решения для задач оперативно-производственного планирования, но на это требуется слишком много времени. Возможность находить оптимальные решения является несомненным преимуществом данных алгоритмов, однако с текущим уровнем развития производственной среды, массовой кастомизацией и другими тенденциями развития процесс решения задач должно быть максимально быстрым. Поэтому эти алгоритмы редко используются в качестве единственных и чаще сочетаются с метаэвристическими алгоритмами.

Наиболее ранними и самыми известными метаэвристическими алгоритмами являются генетический алгоритм и алгоритм поиска с табу. На

сегодняшний день известно множество других метаэвристик, таких как алгоритм колонии муравьев, алгоритм роя частиц, алгоритм дифференциальной эволюции, алгоритм светлячка и т. д. [93] Все алгоритмы являются имитацией природы или биологических процессов и применяются для решения задач оперативно-производственного планирования, показывая хорошие результаты.

Генетический алгоритм является одной из самых популярных метаэвристик, основанной на генетическом эволюционном механизме биологии. Одной из основных характеристик данного алгоритма является непосредственная работа над структурой проблемы без ограничения непрерывности вывода и функции. Алгоритм также обладает возможностями общего поиска и может автоматически настраивать направления поиска и адаптироваться. [44,45] Данный алгоритм будет более подробно рассмотрен в одном из следующих разделов работы.

Поиск с запретами – это итеративный алгоритм оптимизации, который применяет механизмы поиска и хранения решений для достижения глобального оптимума. Хотя этот метод является простой процедурой поиска, он может запрещать варианты, которые похожи на ранее достигнутые решения в соответствии с информацией поиска, хранящейся в памяти, и затем избегать локальных оптимальных решений.

Существуют и другие алгоритмы, которые можно использовать для решения задачи оперативно-производственного планирования, такие как нечеткая логика, которая допускает неточный или нечеткий характер исходных данных и обычно представляет особенные правила для решения конкретной практической задачи.

Метаэвристические методы чаще используются для решения непрерывных задач. В случае если метод достигает хороших результатов для непрерывных задач, он будет использован и для решения дискретных. Для этого необходимо построить набор правил преобразования, и непрерывные функции должны быть изменены на дискретные.

Таким образом, в данном разделе рассмотрены методы решения задач оперативно-производственного планирования. Результатом рассмотрения является разработанная классификация алгоритмов и общая таблица (табл. 2.1) с характеристиками данных алгоритмов и проблемами, которые необходимо решить для улучшения их работы. Каждый из представленных алгоритмов обладает своими преимуществами, недостатками и применим для разных моделей и задач. В целом, правила приоритетов довольно просты для понимания и использования, однако для сложных задач результаты данного метода сильно уступают другим алгоритмам. Эвристики обычно разрабатываются под решение конкретных задач и целевых функций, но и результаты получаются значительно лучше по сравнению с правилами приоритетов. Точные методы лучше подходят для решения небольших задач. Решение реальных задач оперативно-производственного планирования, в связи с их большими размерами и сложностью структуры, обычно, невозможно. Приближенные алгоритмы предназначаются для уменьшения сложности модели оперативно-производственного планирования и / или метода решения. В последнее десятилетие в сфере приближенных алгоритмов наблюдается возрастающий интерес, что может быть связано с развитием компьютерных и информационных технологий. Несмотря на то, что общие схемы могут быть применены к большинству задач оптимизации, процесс создания алгоритма для решения конкретной задачи является сложным. Большим преимуществом является то, что эффективные приближенные алгоритмы часто получают решения очень близкие к оптимальным.

Таблица 2.1

Характеристики алгоритмов решения задач оперативно-производственного планирования

Алгоритмы	Преимущества	Недостатки	Проблемы
1	2	3	4
Точные алгоритмы решения задач оперативно-производственного планирования			
Алгоритмы, основанные на эффективных правилах, алгоритмы математического программирования, метод ветвей и границ	Достижение точного оптимального решения за реальное время для некоторых задач	Возможно решение только задач небольшой размерности	Как децентрализовать оперативно-производственное планирование до задач небольшой размерности для получения оптимальных решений
Приближенные алгоритмы решения задач оперативно-производственного планирования			
Конструктивные алгоритмы	В частных случаях могут решать задачу очень быстро	Возможно построение недопустимых решений	Как исключить возможность построения недопустимых решений
Алгоритмы искусственного интеллекта	Возможность к обучению на ошибках и самообучению	Неудовлетворительное обучение приближению и обобщению при решении	Как улучшить процесс обучения и настроить для создания качественных решений
Алгоритмы локального поиска	Существует возможность нахождения оптимального решения, если будет выделено достаточно времени	Требуют слишком много времени на решение	Как улучшить эффективность алгоритмов
Метаэвристические алгоритмы	Могут быть достаточно эффективными для решения задач оперативно-производственного планирования	Некоторые алгоритмы могут застрять в локальном оптимуме и также возможна низкая эффективность	Как улучшить или объединить методы для получения хорошей эффективности и исключения возможности попадания в локальный оптимум

2.3. Инструменты решения задач оперативно-производственного планирования

В данном разделе будет рассмотрен ряд вопросов, связанных с инструментами, содержащими модели и методы решения задач оперативно-производственного планирования для поддержания процесса принятия решений.

Использование инструментов оперативно-производственного планирования является одним из ключевых факторов успешного применения моделей и методов для решения реальных задач. Более конкретно, в данном разделе буду рассмотрены вопросы удобства принятия решений с помощью программных продуктов – систем поддержки принятия решений, развития инструментов планирования, требований к инструментам планирования и архитектуры инструментов планирования.

Инструменты оперативно-производственного планирования представляют собой сферу, которая редко рассматривается в литературе по планированию, по крайней мере по сравнению с тем вниманием, которое уделяется методам и моделям планирования. Причинами этого можно назвать сложность темы, достаточно узкое направление для исследований и необходимость иметь достаточный опыт в ряде различных дисциплин, таких как разработка программного обеспечения, бизнес-информатика, исследование операций и управление производством.

С одной стороны, разработка и внедрение программного обеспечения для бизнеса – это далеко не простая задача. С другой стороны, эта задача является распространенным явлением как в области исследования операций и науке об управлении, так и на практике на машиностроительных предприятиях. Кроме того, показатели неудачных внедрений и недоиспользования функционала инструментов оперативно-производственного планирования близки к показателям других информационных систем поддержки производства, даже учитывая тот факт, что решение вопросов оперативно-производственного планирования, вероятно, является одним из наименее стандартизированных бизнес-процессов на производственных предприятиях.

Более того, необходимо учитывать, что оперативно-производственное планирование является бизнес-процессом, который предприятие должно выполнять каким-то образом и, соответственно, использование современных инструментов открывает возможности для совершенствования этого бизнес-процесса.

Таким образом, под инструментом оперативно-производственного планирования в данной работе подразумевается программный продукт, который может быть использован лицами, принимающими решения, для получения поддержки при решении задач оперативно-производственного планирования. Такой инструмент должен быть построен с учетом модели – для определения ключевых аспектов решения реальной проблемы подлежащих анализу, и методов – для разработки решений моделей. Повторяющийся характер проблем принятия решений и сложность большинства реальных проблем делают такой инструмент необходимым.

Логично предположить, что один из подходов мог бы заключаться в обеспечении полного компьютерного контроля над функцией оперативно-производственного планирования и контроля хода производства, более реалистичной представляется несколько другая идея: человек и инструмент должны рассматриваться как единое целое, где каждый дополняет другого. Как высказались Мортон и Пентико, люди обладают здравым смыслом, интуицией и способностью суммировать знания. [76] Однако человеческий опыт и здравый смысл трудно передавать другим и существует вариативность реакций, которых можно ожидать от человека. С другой стороны, информационные системы обладают быстрыми вычислительными возможностями и могут одновременно работать с огромным количеством переменных и данных. [7]

Поэтому наилучшим подходом к объединению сильных и слабых сторон человека и компьютера является интерактивная поддержка решений, которые должен принимать человек. При таком подходе вычислительные возможности компьютера используются для итеративного представления человеку полезной информации, помогающей принимать наилучшее решение. Такие инструменты называются системами поддержки принятия решений или СППР. Следует отметить, что термин СППР охватывает большое разнообразие инструментов, касающихся не только оперативно-производственного планирования.

Далее кратко рассмотрим основные характеристики инструментов планирования и их развитие. Данная область начала развиваться с первыми попытками

использовать интерактивные инструменты для планирования в 1960-70х годах. [49] Однако ни одна система того времени не была достаточно успешной, чтобы привести к разработке коммерческого программного продукта. В 1980-90х годах был представлен ряд программных продуктов, фокус которых был направлен на построение допустимых решений при условии выполнения ограничений. Компьютерные технологии стали более доступными, инструменты стали разрабатываться и использоваться на персональных компьютерах. В 1990-2000х годах появилось большое количество программных продуктов, преимущественно на Европейском рынке, многие из которых относились к инструментам для высокоавтоматизированных предприятий. На тот момент было уже достаточно много алгоритмов для решения задач оперативно-производственного планирования. Однако немногие из алгоритмов были встроены в коммерческие программные продукты.

Как видно из краткого обзора, некоторые проблемы и трудности сохраняются на протяжении десятилетий. Несмотря на то, что технологии радикально изменились, человеческий фактор продолжает сильно влиять на решение задач оперативно-производственного планирования.

Компьютеризированный инструмент планирования можно рассматривать как частный случай информационной системы, поддерживающей бизнес-процессы предприятия. [20] Как правило, такие информационные системы можно разделить на пакетное (стандартное) ПО и индивидуальное ПО. [63] Технологические особенности различных производственных систем затрудняют разработку единого подхода к планированию [38], и довольно часто код, разработанный для индивидуализации программного продукта планирования, оказывается более, чем половиной кода окончательной версии. [80] В соответствии с этим, можно сделать предположение, что компьютеризированный инструмент оперативно-производственного планирования производства попадает в категорию индивидуального программного обеспечения.

Учитывая возрастающую сложность программного обеспечения, для обеспечения методологий его эффективной разработки и обслуживания

программного обеспечения была выделена полноценная отрасль информатики, называемая программной инженерией. В данной области были достигнуты особые успехи в создании методологий разработки информационных систем. Хотя эти методологии весьма различны, разработка индивидуальной информационной системы включает ряд мероприятий, которые не зависят от принятого процесса разработки программного обеспечения. [64] Эти мероприятия:

- Анализ требований. Анализ требований заключается в определении потребностей разрабатываемой информационной системы. Эта деятельность обычно включает сбор информации со всех подразделений, вовлеченных в жизненный цикл разрабатываемой системы (заинтересованные стороны), с целью определить: «что должна делать информационная система». Данное мероприятие не должно давать ответ на вопрос, как должна выглядеть информационная система, а скорее должно выстраивать ряд вопросов, на которые следует ответить при разработке инструмента.

- Разработка инструмента. Проектирование системы должно решать вопросы, которые были определены при проведении анализа требований. Обычно разработка разбивается на: описание программных компонентов системы, их взаимосвязей и детальную разработку этих программных компонентов.

- Внедрение инструмента. Внедрение подразумевает преобразование концептуального решения из предыдущих мероприятий в программный продукт.

- Тестирование системы. Данная деятельность заключается в проведении проверок, отладок и доработок внедренного инструмента.

Следует отметить, что эти действия обычно выполняются не последовательно, а с использованием различных моделей разработки программного обеспечения, основанных на концепциях постепенного и итеративного улучшения. Хотя кастомизированные инструменты планирования производства по определению различны для каждого предприятия, некоторые виды деятельности в процессе разработки могут быть общими для всех компаний, поскольку они относятся к высокоуровневым описаниям цели системы.

2.3.1. Требования к архитектуре инструментов оперативно-производственного планирования

Существует ряд бизнес-процессов, зависящих от предприятия, для которых может быть реализован инструмент планирования. Большинство инструментов разделяют ряд требований, поскольку все они должны иметь общие функциональные возможности. Поскольку эти требования отражены в компонентах архитектуры инструментов, очевидно, что некоторые части этой архитектуры также могут быть общими для большинства инструментов оперативно-производственного планирования производства. Использование эффективной, проверенной архитектуры вместо разработки нового инструмента с нуля имеет ряд преимуществ, а именно:

- Сокращение цикла разработки, так как это экономит время (и деньги), которые в противном случае должны бы были быть выделены на анализ требований и проектирование.

- Гарантия, что основные функциональные возможности системы планирования будут учтены. Таким образом, архитектура действует в качестве контрольного списка и как руководство по проектированию для разработчиков.

- Возможность повторного использования для будущих систем части разработанного кода, при условии, что архитектура описана в терминах блоков или функциональных модулей. Эта стратегия используется для разработки программного обеспечения в моделях процессов, ориентированных на повторное использование.

Далее в данном разделе будет определена общая архитектура для инструмента планирования.

Первый шаг в разработке программного продукта состоит в определении требований. В программной инженерии принято различать функциональные и нефункциональные требования. Первые указывают, что должна делать система, то есть какие функции она должна предоставлять своим пользователям. Нефункциональные требования – это общие требования, которым должна отвечать

система, помимо решения конкретных прикладных задач. Такие требования часто относятся к качеству программного обеспечения и производительности системы.

Сфера деятельности оперативно-производственного планирования – это набор бизнес-процессов целевой системы в контексте поддержки решений по управлению производством. В этой связи следует обратить внимание на два вопроса: первый – как определить набор бизнес-процессов, определяющих оперативно-производственное планирование, и второй – существуют ли дополнительные решения по управлению производством, которые обычно рассматриваются как выходящие за рамки функции оперативно-производственного планирования и которые настолько переплетены с ним, что должны быть включены в программный инструмент. [53]

Что касается функции оперативно-производственного планирования, то существует два вида или уровня, в зависимости от временного горизонта:

- Более высокий уровень, использующий выходные данные производственного планирования для настройки дат начала каждой операции на каждом станке. Этот уровень часто называют планированием выпуска.

- Более низкий уровень, связанный с планированием перемещения номенклатуры в реальном времени. Этот уровень обычно обозначается как реактивное планирование.

Эти два уровня должны быть надлежащим образом охвачены системой планирования, что означает, что архитектура системы планирования должна включать функциональные возможности в отношении контроля и выполнения запланированных планов.

Далее перейдем к рассмотрению конкретных требований к архитектуре. Среди наиболее важных выделим: требования к моделированию, функциональные возможности решения задач оперативно-производственного планирования, оценку решений, перепланирование, анализ производительности, пользовательский интерфейс и возможность интеграции с существующими информационными системами.

Требования к моделированию относятся к набору требований, связанных с моделированием условий производства, которые должны быть введены в систему, и к соответствующим оперативно-производственным планам.

- Обнаружение модели. Здесь подразумевается способность инструмента определить наиболее подходящую (теоретическую) модель планирования из имеющихся примеров, предоставленных системе.

- Абстракция ограничений. Способность инструмента работать с упрощенным подмножеством ограничений производства во время решения задач оперативно-производственного планирования. Ограничения, оказывающие небольшое влияние на результат, могут игнорироваться. Инструмент должен использовать минимум два слоя или вида моделей: общее представление, используемое для поиска начальных решений, и детальное – для представления результатов и вариантов решения ЛПР. Приемлемость такого подхода зависит от обеспечения того, чтобы игнорируемые ограничения не оказывали существенного влияния на осуществимость получаемых решений. Проверку этого можно осуществить только в процессе тщательного рассмотрения во время реализации и тестирования инструмента.

- Представление решений. Оперативно-производственные планы, построенные алгоритмами оптимизации, должны быть представлены в доступной форме, например, время начала и окончания для каждой работы.

Раздел функциональных возможностей решения задач относится к функциям, связанным с процедурами решения, которые должны быть интегрированы в систему, и как их использованию. Можно выделить следующие функциональные возможности:

- Планирование несколькими алгоритмами. Необходимо разделение процедур моделирования и решения задачи с целью возможности применения различных алгоритмов к каждой задаче. Наилучшим вариантом является создание библиотеки алгоритмов из всех доступных системе для задач оперативно-производственного планирования.

- Алгоритмы перепланирования. Во многих случаях невозможно полностью перестроить существующие расписания, но необходимо выполнить перепланирование. Для выполнения процесса перепланирования в системе должны быть доступны конкретные алгоритмы, которые обычно отличаются и учитывают целевые функции, связанные со стабильностью планов, такие как минимизация количества изменений в исходном плане.

- Генерация новых алгоритмов. Для того, чтобы развивать бизнес-процесс оперативно-производственного планирования предприятия необходимо иметь возможность интегрировать новые алгоритмы в упрощенном режиме.

- Оценка алгоритмов. Инструмент должен быть в состоянии выбрать / предложить наиболее подходящий алгоритм, необходимый для решения любой конкретной задачи оперативно-производственного планирования.

- Включение человеческого опыта. Способность системы учитывать знания и опыт человека, работающего с инструментом. Поскольку рассматривается общая архитектура системы планирования, будем считать, что эта функция должна быть учтена.

Что касается оценки этого набора функциональных возможностей, способность поддерживать библиотеку алгоритмов оперативно-производственного планирования и перепланирования должна рассматриваться как основная функция инструмента планирования.

Набор функциональных возможностей оценки относится к тому, как решения, найденные с помощью функциональных возможностей, должны оцениваться.

- Оценка различных целевых функций. Инструмент должен позволять оценивать решения в отношении нескольких целевых функций, включая различные их сочетания. [61]

- Анализ сценариев. Система должна позволять управлять различными решениями для анализа «что если». Эта функция особенно полезна, если пользователю разрешено вручную изменять расписания, предлагаемые инструментом.

Что касается категоризации этого набора функциональных возможностей, то оценка решений для различных целевых функций и анализ сценариев должны быть четко обозначены как основные функциональные возможности.

Следующий набор функциональных возможностей относится к способности инструмента выполнять перепланирование. Можно рассмотреть два различных аспекта:

- Мониторинг исполнения. Для принятия решения о необходимости перепланирования человеку необходимо иметь информацию о состоянии производства, а именно контролировать выполнение запланированного ранее оперативно-производственного плана, чтобы измерить отклонение между планом и фактом.

- Автоматический запуск функции планирования / перепланирования. Следующим шагом в развитии инструмента должно стать разрешение инструменту решать, с учетом отклонений от планов, необходимо ли выполнить перепланировку отдельного участка плана, производственного подразделения или всего оперативно-производственного плана целиком.

Таким образом, мониторинг выполнения плана должен рассматриваться как базовая функциональная возможность инструмента, помогающая планировщику контролировать производственную систему, в то время как автоматический запуск функций планирования и перепланирования может быть обозначен как более продвинутый уровень развития системы.

Следующая рассматриваемая область функциональных возможностей – анализ мощности. Этот набор функциональных возможностей можно описать как способность инструмента к обнаружению критических точек и провалов в системе, и, следовательно, он должен помочь планировщику сосредоточить свое внимание в наиболее важных частях процесса. Выделить можно следующие аспекты:

- Анализ возможностей выполнения оперативно-производственного плана. Инструмент должен быть в состоянии обнаружить потенциальные узкие места и недогруженные ресурсы в соответствии с запланированным графиком (или даже в соответствии с фактическим графиком, если система позволяет

контролировать выполнение). Эта функциональность может помочь сосредоточить внимание на узких местах во время выполнения плана и учесть недогруженные ресурсы при построении следующих оперативно-производственных планов.

- Анализ емкости расчетного варианта. Используя эту функцию, инструмент может помочь выявлять потенциальные «узкие» места еще до построения оперативно-производственного плана.

Обе функции являются довольно сложными в разработке.

Далее рассмотрим область, связанную с пользовательским интерфейсом. Существует ряд функциональных возможностей необходимых для информационной системы главным образом для обеспечения интерактивных способов ввода входных данных в систему или извлечения выходных данных, обычно в форме отчетов, из системы. Наиболее важным представляются именно входы и выходы из системы, которые более детально раскрываются как:

- Манипуляции с планами. Должна быть предусмотрена возможность взаимодействия человека с полученными оперативными планами. Важно предусмотреть механизм восстановления возможной недопустимости решений, измененных человеком. В качестве представления решения наиболее часто используют диаграммы Ганта, манипуляции также предполагается делать во взаимодействии с ними.

- Сравнение ручных и автоматических решений. Очевидно, что манипулирование полученными решениями может значительно их ухудшить. Инструмент должен отслеживать это и уведомлять человека об ухудшении показателей целевой функции.

Первая из вышеизложенных функциональных возможностей является одним из главных требований к архитектуре инструмента оперативно-производственного планирования. Ее отсутствие не дает возможности взаимодействовать человеку с решениями, соответственно, ценность и удобство использования значительно уменьшается.

Важной функциональной возможностью является возможность интегрироваться в организационную среду. Это означает, что инструмент оперативно-

производственного планирования должен иметь возможность импортировать необходимые данные и экспортировать результаты. Такой обмен необходим со всеми информационными системами, используемыми на предприятии. Данный аспект является критическим в развитии инструмента. Ряд функциональных возможностей может быть представлен по данному аспекту:

- Проверка входных данных. Инструмент должен обеспечивать функциональные возможности для проверки согласованности и полноты данных, автоматически вводимых в систему. Значительные расхождения между старыми и новыми данными должны быть проверены, и система должна выдавать оповещения и получать разрешения на внесение или отмену таких изменений.

- Анализ осуществимости. Система должна иметь возможность проверить наличие всех необходимых ресурсов для планирования заданий, а именно наличие ресурсов, состояние РЦ и т. д.

Что касается приоритизации различных возможностей инструмента, функциональность проверки считается важной в виду того, что входные данные имеют решающее значение для системы планирования и могут поступать из различных источников различного качества.

Таким образом, в данном разделе определены основные функциональные возможности, необходимые для создания инструмента оперативно-производственного планирования. Вопрос, поднятые в данном разделе, не часто обсуждается в сфере оперативно-производственного планирования по сравнению со сферами моделирования и методами решения. Однако для того, чтобы быть реализованными на практике, эти модели и процедуры должны адекватно отражать детали процесса планирования производства предприятия, что обычно влечет за собой моделирование сценариев, ограничений и целей. Кроме того, полученные модели и методы решения должны быть встроены в систему планирования производства, которая снабжает их надежными и своевременными данными и обеспечивает эффективный способ взаимодействия с пользователями. Это приводит к вопросу о том, какие блоки или компоненты системы планирования производства являются основными и как они связаны. Несмотря на специфичность систем

оперативно-производственного планирования, можно выделить ряд особенностей или функциональных возможностей, составляющих архитектуру инструмента планирования производства. Чтобы проанализировать эти функциональные возможности, была рассмотрена и классифицирована архитектура систем оперативно-производственного планирования.

Автоматизированная система должна служить для поддержки решений человека, а не для его замены. В предлагаемой архитектуре эта идея поддерживается, подчеркивая необходимость того, чтобы инструмент позволял вручную изменять графики для управления различными сценариями, возможно, с различными целями / ограничениями, или включать алгоритмы перепланирования, среди других функций.

В данной работе предполагается представить только высокоуровневый анализ инструмента планирования, который является уровнем детализации, достаточным для представления в качестве общей архитектуры.

ГЛАВА 3. СИСТЕМА ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Данный раздел будет посвящен интеграции трех элементов, рассмотренных в предыдущих разделах, т.е. моделей, методов и инструментов, в систему оперативно-производственного планирования. Для этого необходимо рассмотреть процесс оперативно-производственного планирования и как эти три элемента могут способствовать его улучшению. Более конкретно, в данном разделе будут решены следующие задачи:

- рассмотрен вопрос интеграции трех элементов в систему;
- изложены организационные аспекты оперативно-производственного планирования;
- построена математическая модель, описывающая производственные процессы машиностроительного предприятия;
- предложены алгоритмы для решения задачи оперативно-производственного планирования;
- произведена апробация модели и алгоритмов на реальных задачах оперативно-производственного планирования.

В предыдущих разделах рассматривались различные элементы, составляющие систему оперативно-производственного планирования. С учетом широты и сложности некоторых из этих вопросов, отдельные их аспекты были упомянуты довольно кратко. Теперь, когда рассмотрены все элементы возникает необходимость собрать их в единую систему оперативно-производственного планирования.

Ранее в работе система оперативно-производственного планирования была определена как комбинация моделей, методов и инструментов вместе с человеком, участвующим в процессе оперативно-производственного планирования. Для осуществления эффективной интеграции необходимо, чтобы система оперативно-производственного планирования отражала потребности и ожидания предприятия, а также чтобы разработанный инструмент использовался эффективным образом. Первое из требований тесно связано с пониманием того, как

происходит процесс оперативно-производственного планирования на предприятии. Обычно этот процесс выполняется человеком, поэтому необходимо понимать природу человеческого планирования, основные виды деятельности и функции, и, самое главное, как они могут быть внедрены в инструмент планирования.

На этом этапе достаточно очевидно, что оперативно-производственное планирование является сложной многофакторной проблемой, что формирует множество различных взглядов и перспектив, фокусирующихся на конкретных вопросах в процессе планирования. Точки зрения обычно сводятся к трем аспектам: решение проблем, принятие решений и организационные вопросы. Данные точки зрения следует рассматривать как взаимодополняющие. Вопрос о том, какая из них должна быть преобладающей, зависит от конкретного предприятия. Важно, чтобы и пользователи, и разработчики системы оперативно-производственного планирования понимали, что система не является ни базой данных, ни программным обеспечением, ни процедурой оптимизации.

Организационные проблемы или проблемы, связанные с человеческим фактором, – это действительно сложный вопрос, подробный анализ которого выходит за рамки данной работы. Поэтому здесь ограничимся пониманием роли человека в системе планирования и природы практики планирования в качестве основы для разработки более эффективных систем планирования, а также для изучения того, как они могут быть интегрированы в существующие системы планирования производства.

Для надлежащего решения организационных вопросов планирования производства следует рассмотреть, по крайней мере, следующие вопросы:

- Каков «человеческий» подход к оперативно-производственному планированию, т. е. как выполняется бизнес-процесс на предприятии?

- Как функции, определенные в предыдущем вопросе, могут быть интегрированы в систему планирования? Более конкретно, как эти функции могут быть приняты во внимание при разработке инструмента планирования, моделей и методов?

Рассмотрим задачи, которые обычно решает человек, занимающийся оперативно-производственным планированием:

- Построение оперативно-производственных планов.
- Решение проблем, связанных с построенными планами. Обычно они решаются путем изменения ресурсов, процессов, количества, сроков и т.д. Важной характеристикой этой задачи является то, что она выполняется в срочном порядке.
- Предотвращение возникновения будущих проблем. Для этого тратится много времени на проверку и исправления несоответствий между различными источниками информации.

Рассматривая вопрос того, как выполняются эти задачи можно упомянуть МакКея и Бузакотта. [74] Они обнаружили, что можно выделить общие моменты в системах оперативно-производственного планирования, и представили стратегию или процесс, состоящий из семи шагов:

1. Оценка ситуации. Анализируется текущая ситуация в производстве, и определяются различия между фактической и ожидаемой ситуациями. Анализ может выполняться с помощью систем оперативно-производственного учета, производственных совещаний или путем выхода в производство.

2. Определение «кризиса». Следующим шагом является выявление особых проблем в производстве. Как правило, это могут быть отставание от сроков изготовления, выход РЦ из строя, возникновение большого количества брака. Частью данного шага является определение критичности проблемы: действительно важная, «кризисная» проблема или проблема, которую необходимо взять на контроль. Не всегда нужно включаться во все проблемы, зачастую этот вопрос можно решить без влияния на оперативно-производственный план.

3. Перепланирование и перераспределение задач. Используя информацию о состоянии производства и приоритетности различных вопросов, разрабатывается ряд мероприятий для исправления отклонений от ожидаемых планов.

4. Полное обновление оперативно-производственного плана. При полном перепланировании учитываются уже выполненные работы и распределяется приоритет оставшимся.

5. Определение будущих проблем. Предполагается выявлять проблемы с планами на более длинный горизонт планирования. Могут быть обозначены наиболее трудные работы в будущих заказах, комплектующие с длительным циклом поставки и т.п.

6. Решение будущих проблем. После определения проблем на 5 этапе, разрабатываются мероприятия для предотвращения их влияния на оперативно-производственные планы. Выявляются возможные риски и предпринимается попытка минимизировать или избежать их воздействия.

7. Регулировка оперативно-производственного планирования. Человек предпринимает попытки нахождения лучшего использования производственных ресурсов. Также он решает конфликты балансировки сроков выполнения и ограничений производительности.

Из описания этого процесса можно извлечь ряд идей о том, как система поддержки принятия решений способна улучшить процесс оперативно-производственного планирования. Кроме того, сам процесс может привести к определенным особенностям, характерных для человека в процессе планирования. Выделим ряд особенностей присущих человеку:

- Люди, как правило, имеют «близорукое представление» о процессе оперативно-производственного планирования.

- Человек быстрее уменьшает сложность задачи. Люди могут применять различные подходы и методы для того, чтобы сузить проблему до планирования работы одного РЦ – узкого места, например, подход «барабан-буфер-веревка». Также они могут объединять различные наборы работ в одну, например, отдельные ДСЕ – в сборку, для работы с меньшим количеством информации.

- Существует большая вариативность в практике ручного планирования, так как конкретные оперативно-производственные планы могут зависеть от опыта, знаний конкретного человека.

- Люди используют собственные источники информации. Вместо того, чтобы работать с огромным количеством информации, человек может установить и использовать собственные «информационные сети». В качестве источников могут выступать устное общение в производстве, «неофициальные» источники информации и взаимодействие с другими отделами предприятия.

- Человек может использовать нестандартную эвристику, которую он считает наилучшей.

- Человек должен уметь выявлять и понимать, как устранять возможные проблемы с оперативно-производственными планами.

Таким образом, была рассмотрена интеграция моделей, методов и инструментов оперативно-производственного планирования в единую систему. Также были изложены организационные аспекты. Внимание было уделено пониманию природы планирования человеком, основным видам деятельности и особенностям. Большинство задач, которые выполняет человек являются реактивными, а не прогнозными. Это определяет то, как человек выполняет свои задачи, и может дать ответ на вопрос, как лучше всего включить человека в систему организационно-производственного планирования.

3.1. Построение математической модели оперативно-производственного планирования машиностроительного производства

Как упоминалось ранее, математическая модель оперативно-производственного планирования находится в прямой зависимости от рассматриваемой производственной системы, ее особенностей и постановки задачи.

В качестве производственной системы в данной работе рассматривается предприятие ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» и его производственные процессы.

История предприятия началась в 1890 году с открытия механических мастерских инженером-технологом И.А. Семеновым. Эту точку можно назвать отправной в истории создания «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ». В первых мастерских были разработаны и изготовлены гильзо-набивные машины для производства папирос. [21]

Сейчас «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» является многопрофильным ХОЛДИН-Гом, который включает в себя организации производственного дивизиона, дивизиона управления недвижимостью и гостинично-туристического дивизиона.

Основным направлением холдинга является производственный дивизион, базовым предприятием которого является ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ». Данный дивизион холдинга производит изделия точного приборостроения и машиностроения, предназначенные для эксплуатации в жестких механико-климатических условиях, в первую очередь для нужд Министерства обороны Российской Федерации. Все изделия отличаются высокой надежностью и качеством. [22] В состав производственного дивизиона входит 7 производственных предприятий, которые занимаются различными направлениями деятельности, такими как:

- механообрабатывающие и механосборочные производства;
- производство изделий из пластмасс литьем;
- деревообрабатывающее производство;
- инструментальное производство.

Также в ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» входят 2 специальных конструкторских бюро, опытное производство, технологическое бюро, испытательный центр, служба эксплуатации, отдел внешней и внутренней кооперации, отдел технического контроля качества, отдел снабжения, отдел внешней комплектации. Это позволяет обеспечивать полный жизненный цикл изделия от возникновения идеи до утилизации, включая поддержку серийного выпуска, гарантийный ремонт и послегарантийное обслуживание.

Миссия организации состоит в изготовлении высококачественной, конкурентоспособной продукции, соответствующей лучшим мировым образцам, которая удовлетворяет потребности потребителей и обеспечивает улучшение финансового положения холдинга при реализации этой продукции.

В целом производство ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» можно охарактеризовать как дискретное, серийное, много-продуктовое. Данные характеристики, а также ряд других факторов приводят к тому, что планирование производства

имеет некоторые особенности расчета и организации производственного процесса в целом. Сложность возникает, прежде всего, в связи с большим количеством изделий, входящих деталей и сборочных единиц, особым расчетом себестоимости и сопровождением производственного заказа.

На предприятии внедрено или в настоящее время внедряется несколько информационных систем, где каждая из них отвечает за свой набор функций, общая схема представлена на рис 3.1.

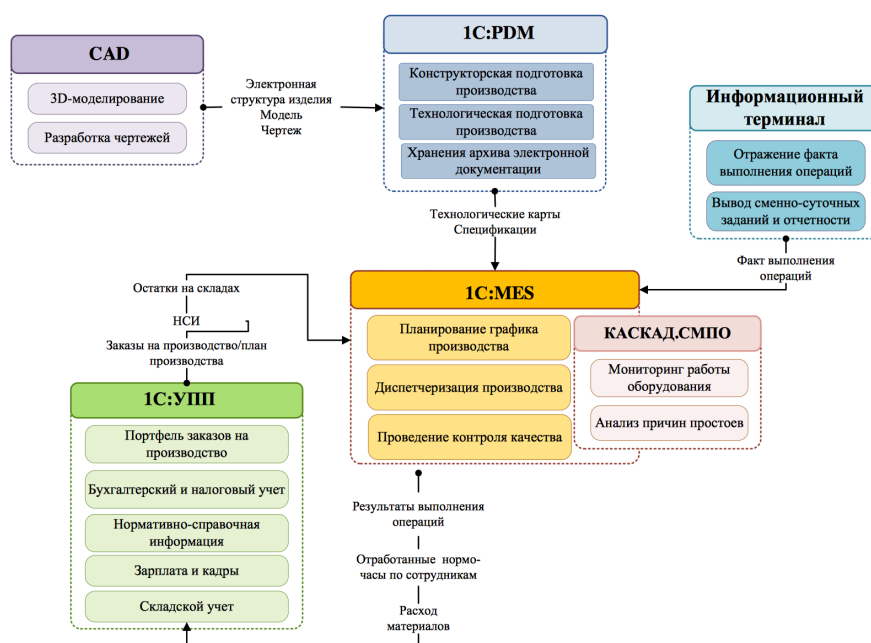


Рис. 3.1 Общая схема информационных систем и их взаимосвязей на предприятии ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ»

Несмотря на то, что в программном продукте «1C:MES Оперативное управление производством» предусмотрен модуль планирования производства, в настоящее время оперативно-производственное планирование выполняется в полу-ручном режиме или основывается на опыте и знаниях сотрудников. В связи с этим, построение математической модели является необходимым шагом для создания системы оперативно-производственного планирования на предприятии ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ».

В общем виде задача оперативно-производственного планирования может быть сформулирована следующим образом: заказ на производство и производственная программа состоят из некоторого конечного числа работ – деталей и сборочных единиц, которые необходимо изготовить на имеющемся парке оборудования и других рабочих местах – рабочих центрах. На предприятии ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» РЦ объединяются по различным признакам в группы оборудования – группы заменяемости РЦ. Производство каждой ДСЕ состоит из заданной последовательности операций – технологического процесса. Каждая операция может выполняться на одном РЦ из соответствующей группы. Некоторое количество ДСЕ не требует других ДСЕ для их изготовления, т.е. не являются сборками, и к их изготовлению можно приступать с самого начала планируемого периода. РЦ могут обрабатывать только один тип ДСЕ одновременно. Изготовление ДСЕ на РЦ не прерывается после начала обработки. Время транспортировок между операциями может быть включено в ПЗ время или не учитываться в случае, если оно незначительно. Длительность ПЗ времени постоянно и не зависит от РЦ из группы, ПЗ определено на всех операциях, где оно необходимо.

На основе основных характеристик производственной системы был составлен список ограничений и допущений, которые будут учтены при построении математической модели:

- Вся нормативно-справочная информация определена и зафиксирована на момент планирования – модель статическая.
- Количество изделий, рабочих центров, технологических операций, входящих в изделие ДСЕ и применяемость постоянны.
- Для каждой операции определен хотя бы один РЦ и хотя бы одна операция может быть выполнена на нескольких РЦ, входящих в одну группу взаимозаменяемости.
- РЦ может выполнять только одну операцию одновременно.
- Обработка ДСЕ по каждой операции осуществляется только на одном РЦ из группы взаимозаменяемости.

- Время выполнения операции постоянно и не зависит от выбранного РЦ.
- Подготовительно-заключительное время для операции постоянно и не зависит от выбранного РЦ.
- Изготовление ДСЕ на РЦ не прерывается после начала обработки.
- Следующая операция по технологическому процессу может быть начата сразу после окончания предыдущей.
- Время транспортировки между операциями незначительно или включено в ПЗ.
- РЦ доступны всегда, без поломок, в течении всего рабочего времени.
- Условия последовательности изготовления ДСЕ задаются в форме ориентированного графа.

Целевая функция модели определена как минимизация общей продолжительности изготовления всех ДСЕ в производственной программе определенного размера – C_{\max} .

Для лучшего понимания математической модели введем соответствующие параметры и переменные:

Индексы:

i, h – индексы для ДСЕ ($i = 1, 2, \dots, D$; $h = 1, 2, \dots, D$);

j, g – индексы для операций ($j = 1, 2, \dots, J_j$; $g = 1, 2, \dots, J_g$);

m – индекс для РЦ ($m = 1, 2, \dots, M$);

k – индекс последовательности операций, назначенных на m РЦ ($k = 1, 2, \dots, k_m$).

Параметры:

$D = \{D_1, D_2, \dots, D_i\}$ – множество ДСЕ;

$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ – множество РЦ;

J_i – количество операций по i -ой ДСЕ;

O_{ij} – j -ая операция над i -ой ДСЕ;

p_{ij} – продолжительность выполнения j -ой операции над i -м ДСЕ, сек.;

a_{ijm} – булева переменная, которая принимает значение равно 1, если O_{ij} может быть выполнена на m РЦ, 0 в противном случае;

L – большое число.

Переменные:

S_{ij} – момент времени начала выполнения O_{ij} , сек.;

C_{ij} – момент времени окончания выполнения O_{ij} , сек.;

C_i – момент времени окончания изготовления i -го ДСЕ;

C_{\max} – общая продолжительность изготовления всех ДСЕ, сек.;

k_m – количество назначенных на m -й РЦ операций;

SM_{mk} – начало рабочего времени для m -го РЦ по k очереди, сек.;

X_{ijmk} – булева переменная, принимающая значение равно 1, если O_{ij} назначена на m -е РЦ на k -ое место в очереди, 0 в противном случае;

Y_{ijm} – булева переменная, принимающая значение равно 1, если m -й РЦ выбран для исполнения O_{ij} , 0 в противном случае;

Z_{hi} – булева переменная, принимающая значение равно 1, если i -ая ДСЕ входит в состав h , 0 в противном случае.

Математическая модель:

Целевая функция (1) минимизирует общее время изготовления всех ДСЕ.

$$C_{\max} \rightarrow \min \quad (1)$$

Ограничение (2) определяет время завершения изготовления производственной программы, т.е. всех ДСЕ.

$$C_{\max} \geq C_i, \quad \forall i \quad (2)$$

Ограничение (3) определяет время завершения изготовления каждой ДСЕ, который входит в производственную программу.

$$C_i \geq \max \{C_{ij}\}, \quad \forall i, j \quad (3)$$

Ограничение (4) определяет, что прерывания операций не разрешены и рассчитывает время завершения каждой из операций над каждой ДСЕ.

$$C_{ij} = S_{ij} + p_{ij}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

Ограничение (5) задает строгое следование процессу производства ДСЕ, т.е. технологическому процессу.

$$S_{ij} + p_{ij} \leq S_{ij+1}, \quad \forall i, \forall j = 1, 2, \dots, J_{j-1} \quad (5)$$

Ограничение (6) является дизъюнктивным, т.е. выполняться должно только одно ограничение. Оно означает, что операция O_{hg} не должна быть выполнена до операции O_{ij} при условии, что они выполняются на одном РЦ. Другими словами, данное ограничение задает требование к соблюдению последовательности изготовления ДСЕ для конкретного РЦ.

$$\left[(C_{hg} - C_{ij} - p_{hg}) \cdot x_{ijmk} x_{hgmk} \geq 0 \right] \vee \left[(C_{ij} - C_{hg} - p_{ij}) \cdot x_{ijmk} x_{hgmk} \geq 0 \right], \quad \forall (i, h), (j, g), m, k \quad (6)$$

Ограничение (7) гарантирует, что изготовление сборочных ДСЕ не начнется раньше, чем изготовлены все входящих в них ДСЕ.

$$\min \{ S_{hg} \} \geq \max \{ C_{ij} \} \cdot Z_{hi}, \quad \forall (i, h), (j, g) \quad (7)$$

Ограничение (8) не позволяет каждому РЦ обрабатывать более одного типа ДСЕ одновременно.

$$SM_{mk} + p_{ij} \cdot X_{ijmk} \leq SM_{mk+1} \quad \forall i, j, m, k = 1, 2, \dots, k_{m-1} \quad (8)$$

Ограничения (9 и 10) определяют, что выполнение операции O_{ij} может начинаться только после того, как выбранный РЦ освободился от предыдущей операции и операция O_{ij-1} завершена.

$$SM_{mk} \leq S_{ij} + (1 - X_{ijmk}) \cdot L \quad \forall i, j, m, k \quad (9)$$

$$SM_{mk} + (1 - X_{ijmk}) \cdot L \geq S_{ij} \quad \forall i, j, m, k \quad (10)$$

Ограничение (11) распределяет операции на РЦ для всех ДСЕ.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijmk} = 1, \quad \forall m, k \quad (11)$$

Ограничение (12) определяет, что только один РЦ из группы взаимозаменяемости используется для выполнения конкретной операции.

$$\sum_{m=1}^M Y_{ijm} = 1, \quad \forall i, j \quad (12)$$

Ограничение (13) выбирает подходящий РЦ для каждой операции.

$$Y_{ijm} \leq a_{ijm} \quad \forall i, j, m \quad (13)$$

Ограничение (14) гарантирует, что выполнение операции над ДСЕ будет происходить только один раз и в одном приоритете на РЦ.

$$\sum_{k=1}^{k_m} X_{ijmk} = Y_{ijm} \quad \forall i, j, m \quad (14)$$

Ограничения (15, 16, 17) задают условия не-отрицательности переменных.

$$S_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$C_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$SM_{mk} \geq 0, \quad \forall m, k \quad (17)$$

Ограничения (18,19,20) задают значения булевых переменных.

$$X_{ijmk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, m, k \quad (18)$$

$$Y_{ijm} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, m \quad (19)$$

$$Z_{hi} \in \{0,1\}, \quad \forall i, h \quad (20)$$

Таким образом, разработанная модель гарантирует, что каждая операция каждой ДСЕ запланирована на конкретном РЦ, и у каждого РЦ формируется последовательность назначенных к выполнению операций.

3.2. Разработка алгоритмов решения задачи оперативно-производственного планирования

На основе ранее представленной информации о методах и алгоритмах оперативно-производственного планирования, для разработки были выбраны «жадный» и генетические алгоритмы. Выбор был обусловлен тем, что реальные задачи оперативно-производственного планирования в большинстве случаев

являются NP-трудными и использование точных алгоритмов для решения не является наилучшим вариантом, в виду вычислительной сложности и времени, необходимого для получения оптимального решения. Поэтому несмотря на то, что построенная модель является упрощением реальной производственной системы, для разработки и решения задачи оперативно-производственного планирования были выбран путь использования приближенных алгоритмов и нахождения квазиоптимальных решений.

Первый из разработанных алгоритмов решения задачи оперативно-производственного планирования можно считать представителем «жадных» алгоритмов, связанных с правилами приоритетов. «Жадные» алгоритмы входят в состав эвристических алгоритмов. Основным принцип заключается в выборе наилучшего варианта на каждом шаге с расчетом на то, что итоговое решение будет оптимальным. [34] Иными словами, алгоритмы основываются на предположении, что локально-оптимальные решения приведут к оптимальному решению глобальной задачи. Данная эвристическая стратегия не всегда дает оптимальное решение, но, как правило, даёт хорошее приближение.

«Жадные» алгоритмы отличаются низкой вычислительной сложностью и подходят для широкого класса задач, что было одним из факторов выбора данного алгоритма для разработки в рамках данной работы.

Использование «жадного» алгоритма предполагает разбиение сложной задачи на более простые – декомпозицию. Все подходы к решению могут быть классифицированы по признаку декомпозиции и разделены на три категории: на основе работ или изделий, на основе ресурсов или РЦ и на основе событий. В работе выбран подход, основанный на событиях. Подобные подходы разбивают проблему до уровня операций и определяют, какая работа должна выполняться на РЦ на каждом этапе производственного процесса. Вместо планирования всех операций, включенных в процесс изготовления изделия, операции планируются отдельно. Конечно, последовательности изготовления между операциями ДСЕ должны быть при этом сохранены.

В подходах, основанных на событиях, считается, что время изменяется от события к событию. Рассматриваемые события – это мероприятия, которые изменяют состояние системы и требуют выполнения некоторых действий. В каждом случае учитывается текущее состояние системы и предпринимаются действия, такие как запуск новой операции в производство на РЦ. При разбиении проблемы до уровня события открывается больше возможностей для применения правил, которые определяют приоритетность обхода РЦ и выбора одновременно доступных операций. В работе было выделено правило приоритетов, согласно которому приоритетной является операция с наибольшим временем изготовления последующих операций в дереве изделия – длинно-цикловая операция. Далее приведен «жадный» алгоритм, который выполняется в каждый момент совершения события.

Предложенный алгоритм состоит из 3-х шагов.

Шаг 1: Обход всех рабочих центров, на которых доступно выполнение какой-либо операции в текущий момент времени.

Шаг 2: Выбор любого РЦ, у которого очередь уведомлений не пуста, то есть существуют операции, которые можно выполнить, из списка доступных этому РЦ операций в текущий момент времени. В соответствии с «жадным» критерием и правилом приоритета выбирается операция. Если количество доступных операций меньше минимума из передаточной партии и требуемого количества, то РЦ не будет брать их в работу. В случае удовлетворения предыдущих условий и соответствия ограничениям математической модели, операция занимает место в оперативно-производственном плане и момент завершения операции фиксируется как событие. Если РЦ не может выполнить ни одну операцию, он исключается из рассмотрения до момента наступления следующего события.

Шаг 3: Выбор следующего РЦ и повтор шага 2. Если ни один РЦ не может взять операцию, то происходит завершение работы алгоритма и переход к следующему событию. В момент завершения события последующие по технологическому процессу операции добавляются в множество операций к выполнению

и привязываются к последующим событиям, и все РЦ, которые могут их выполнять, получают уведомления о появлении новых доступных операций.

В каждый момент времени, за исключением начального, алгоритм перебирает очень небольшое количество РЦ и доступных к выполнению операций. Данный подход существенно увеличивает быстродействие алгоритма по сравнению с подходами, основанными на работах или ресурсах. При планировании производственной программы, в которой задействовано 447 РЦ, среднее число РЦ в переборе составляло 8 РЦ.

Вторым алгоритмом, разработанным в данной работе, является генетический алгоритм. Данный класс алгоритмов является крайне эффективным в контексте решения задач оперативно-производственного планирования. Алгоритм основан на механизме естественной эволюции. Принцип его работы заключается в имитации процессов воспроизводства и естественного отбора популяций для достижения эффективности и надежности оптимизации. С помощью процесса искусственных последовательных эволюций поколений, находят наилучшие адаптации для решения проблемы. Каждое поколение состоит из популяции хромосом, также называемых индивидуумами, и каждая хромосома представляет собой допустимое решение задачи. Важными вопросами при построении генетического алгоритма являются: построение первого поколения, создания новых популяций, определение критерия остановки работы алгоритма. [50]

Первое поколение может быть получено различными способами, например, формироваться случайно, на основе эвристических алгоритмов или каким-то другим образом. Для каждого индивидуума рассчитывается результат решения, который обычно основывается на значении целевой функции и выполнении ограничений рассматриваемой модели.

Для создания новых популяций используются такие функции генетических алгоритмов, как воспроизводство, принцип «выживания наиболее приспособленного» и генетические операции рекомбинации (кроссинговер) и мутации. Операция воспроизводства включает в себя выбор хромосомы из текущей популяции и предоставления ей возможности выжить путем копирования ее в новую

популяцию. Данная функция используется для особей с наилучшими значениями целевой функции. Для запуска процедур кроссинговера и мутации, из популяции случайно выбирается одна или две хромосомы. Кроссинговер, или скрещивание, заключается в замене двух случайно расположенных субхромосом двух спаривающихся хромосом. Мутация применяется к случайно выбранным генам хромосомы, некоторые случайные гены заменяются на другие из разрешенного интервала. Функция мутации не является обязательной для работы генетики, и в предложенном в алгоритме она не использовалась. Популяция потомков заменяет предыдущее поколение полностью или частично, и процесс повторяется для множества поколений с целью нахождения наилучшего индивидуума, который и будет являться наилучшим решением задачи оперативно-производственного планирования.

Обычно у генетических алгоритмов нет очевидного критерия остановки, особенно для больших задач, поэтому необходимо сообщить алгоритму, когда ему остановиться. В качестве критериев остановки могут выступать: время работы алгоритма, количество поколений, количество поколений без улучшения значения целевой функции или какой-то специфический критерий для конкретной задачи. В рассматриваемом алгоритме пробовались несколько вариантов и основным критерием было выбрано время работы алгоритма.

Наиболее простое описание генетического алгоритма представлено в [33]:

1. Построить начальную популяцию.
2. Рассчитать значение целевой функции для каждого индивидуума в популяции.
3. Повторять, пока не будут достигнуты критерии остановки алгоритма:
 - 3.1. Выбрать наилучших индивидуумов для воспроизводства.
 - 3.2. Создать новую популяцию с помощью генетических операций.
 - 3.3. Оценить значение целевых функций потомков.

Предложенный в работе алгоритм имеет ряд отличий от классического генетического алгоритма. Перед запуском алгоритма задается количество особей в популяции и время работы алгоритма. Время работы алгоритма является

критерием остановки. Процесс формирования начального поколения представляет собой следующую схему:

1. Формирование множества операций, которые можно выполнить. В начальный момент времени оно состоит из первых операции ДСЕ, для изготовления которых не нужны другие ДСЕ, то есть таких, которые можно начать делать в начальный момент времени;

2. Случайно выбирается одна операция, и в качестве первого гена в хромосоме закладывается номер ДСЕ этой операции, в набор доступных операций попадает следующая операция по этой ДСЕ.

3. Для каждой ДСЕ отслеживается, необходимо ли для ее выполнения завершение других операций, так реализуется принцип последовательности изготовления. Если все операции по всем необходимым ДСЕ выполнены, в набор попадают первые операции уровня выше из дерева изделия.

4. Процесс повторяется, пока множество доступных операций не будет пустым.

Далее приведен простой пример формирования хромосомы. Допустим, что у нас имеется три ДСЕ с номерами 1,2,3, при этом 3 – сборка, состоящая из 1 и 2. Для изготовления каждой ДСЕ необходимо выполнить 2 операции. Выделим множество операций, которые мы можем запланировать. В начальный момент времени это первые операции для 1 и 2 ДСЕ, которые обозначим как 1.1 и 2.1. Случайно выбираем одну из них и в качестве гена помещаем в последовательность. При этом добавим следующую операцию и проверим, не добавляются ли в множество операции других ДСЕ. Если случайно была выбрана операция 1.1, то в множество добавится операция 1.2. Далее для краткости: {множество} – операция, добавляемая в хромосому.

{1.1, 2.1} – 1.1;

{1.2, 2.1} – 2.1;

{1.2, 2.2} – 1.2;

{2.2} – 2.2;

{3.1} – 3.1;

{3.2} – 3.2.

Как только множество становится пустым, процедура формирования начального решения считается завершённой, в рассмотренном примере хромосома имеет вид «121233». За счет случайности мы можем получить различные решения, каждое из которых является корректным. После этого оценивается целевая функция каждого решения.

Далее рассмотрим процесс формирования нового поколения. Лучшая особь гарантированно попадает в новую популяцию без скрещивания. Иначе существует вероятность потерять лучшее решение, которое из-за скрещивания может стать хуже. Из генетических операций оставлен только кроссинговер, мутация не включена в алгоритм, так как при ее реализации увеличивается время на создание новой популяции и ухудшается качество получаемых решений за равные промежутки времени, в рамках периода в 24 часа.

Операция кроссинговера в алгоритме реализована и работает по следующей схеме: случайно выбирается два числа в промежутке от нуля до длины хромосомы, распределение равномерное и они назначаются началом и концом субхромосомы, также случайно выбирается место для вставки в хромосоме. Далее представлен пример работы операции кроссинговера. Возьмем тот же пример и предположим, что мы выбрали 2 хромосомы:

2 1 1 2 3 3 и 1 2 1 2 3 3

Во второй случайным образом выделим субхромосому – допустим 2 1 2. Вставим ее в случайное место первой особи – 2 (2 1 2) 1 1 2 3 3. Далее проходим по последовательности, исключая операции, которые мы в данный момент уже выполнили или еще не можем выполнить:

2 2 1 - остаётся без изменений;

2 - уже выполнили;

1 - оставляем в последовательности;

1 2 - уже выполнили;

3 3 – оставляем.

В итоге получаем новую особь: 2 2 1 1 3 3. Далее происходит оценка целевой функции, в рассматриваемой в работе задаче – минимальное время изготовления всех ДСЕ и наилучшие особи участвуют в последующих этапах эволюционных улучшений до момента наступления критерия остановки.

3.3. Апробация модели и методов решения задачи оперативно-производственного планирования

Реализация алгоритмов была выполнена на языке C++ с возможностью обращения к информационной базе предприятия ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ». Для взаимодействия был реализован механизм, способный брать необходимые данные из информационной системы предприятия «1С: MES Оперативное управление производством». Данная система является основной системой производственного учета на предприятии. Механизм взаимодействия был необходим для того, чтобы произвести проверку работы алгоритма на реальных данных и носила прикладной характер.

Механизм взаимодействия позволил использовать нормативно-справочную и другую информацию предприятия: о заказах на производство, спецификациях, технологических процессах, доступных рабочих центрах, графике их работы, количестве необходимых изделий к изготовлению, входящих в них ДСЕ и применяемости, штучном и подготовительно-заключительном времени.

Запуск алгоритмов осуществлялся на данных предприятия. Однако с целью сохранения информации, являющейся коммерческой тайной предприятия и информацией об изделиях для специальных условий эксплуатации, и, в то же время, с целью иметь возможность представить практические результаты – была выполнена переработка информации. Исходные данные для одной из рассмотренных задач представлены в табл. 3.1

Таблица 3.1

Исходные данные для задачи оперативно-производственного планирования №1

Наименование детали	Номер операции	Рабочие центры	Время подготовительно- заключительное, сек.	Время выполнения шт., сек.
1	2	3	4	5
ДСЕ №1	O ₁₁	1	1500	3
	O ₁₂	2	1500	92
	O ₁₃	3,4,5	300	10
	O ₁₄	6	1200	5
	O ₁₅	7,8,9	3900	450
ДСЕ №2	O ₂₁	10	900	1
	O ₂₂	11	0	3
	O ₂₃	12	0	1
	O ₂₄	7,8,9	2400	529
	O ₂₅	13	1500	207
	O ₂₆	7,8,9	1200	106
	O ₂₇	14,15	2400	414
	O ₂₈	3,4,5	300	92
ДСЕ №3	O ₃₁	3,4,5	300	69
	O ₃₂	7,8,9	1500	212
	O ₃₃	14,15	2400	551
	O ₃₄	3,4,5	300	184

В рассматриваемом примере предполагается производственная программа на изготовление 400 изделий ДСЕ №3. ДСЕ №1 и ДСЕ №2 входят в состав ДСЕ №3 с применяемостью 1. На основе исходных данных был запущен «жадный» алгоритм. Результаты оперативно-производственного плана представлены в виде диаграммы Гантта на рис. 3.2.

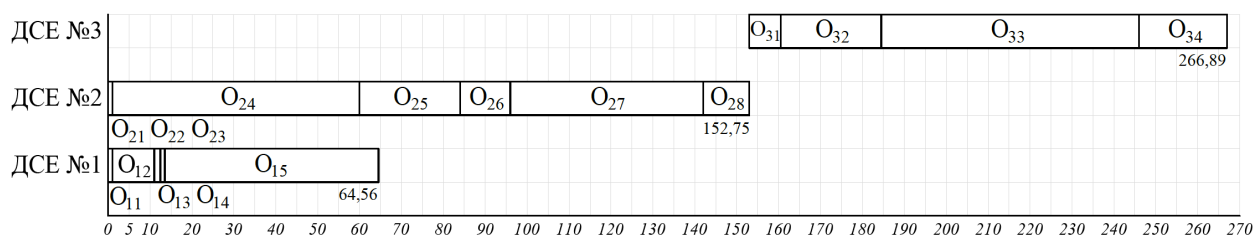


Рис. 3.2 Диаграмма Гантта выполнения производственной программы №1

Для оценки качества получаемых решений был выбран ряд изделий различной сложности изготовления и проведено сравнение с алгоритмом реализованным в текущей версии «1С: MES Оперативное управление производством». Алгоритм в текущей версии 1С:MES можно отнести к классу «жадных» алгоритмов так же, как и первый алгоритм, представленный в данной работе. Однако отличительной особенностью данного алгоритма является уровень декомпозиции. На предприятии уровнем декомпозиции алгоритма является работа или отдельное ДСЕ. Расписание разрабатывается путем планирования изготовления ДСЕ по порядку приоритетов. Все операции ДСЕ планируются одновременно. Такой подход приводит к тому, что в оперативно-производственном плане РЦ простаивают в ожидании высокоприоритетного задания, в то время как другие ДСЕ ожидают очереди, даже если могут быть обработаны за время меньшее, чем период ожидания.

Для сравнения результатов разработанных методов решения задачи оперативно-производственного планирования с используемым на предприятии, были отобраны 3 примера производственных программ предприятия. Первая представлена ранее в табл. 1, ее размерность 3×15 , то есть 3 типа ДСЕ, каждая со своим технологическим процессом, и 15 РЦ. Для предприятия данная программа является относительно небольшой по размеру. В качестве второй производственной программы выбрана квартальная программа одного из блоков основного изделия предприятия, размерность – 15×53 . Третья производственная программа представляет собой набор ДСЕ, используемых в конечном изделии, также являющихся частью квартальной программы основного изделия и проходящих через одни и те же РЦ, размерность задачи – 21×70 . Так как в работе рассматривается

статическая задача, построение оперативно-производственных планов производилось с условием, что все рабочие центры свободны на всем горизонте планирования и другие заказы не попадают в систему и, соответственно, не могут оказать влияние на сроки изготовления. Заказы планировались от одной даты, как для разработанных алгоритмов, так и в MES для исключения возможности несоответствия сроков из-за разного количества выходных дней, сокращенных смен в предпраздничные дни и т.п. Производство работает в односменном режиме, результаты сравниваются в разрезе количества календарных дней и часов, необходимых на выполнение производственной программы. Результаты сравнения алгоритмов представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты алгоритмов по разным задачам оперативно-производственного планирования

	Размерность задачи	1С: MES	«Жадный» алгоритм	Генетический алгоритм
Производственная программа №1	3x15	47 дней (267 ч.)	47 дней (267 ч.)	47 дней (267 ч.)
Производственная программа №2	15x53	67 дней (377 ч.)	67 дней (377 ч.)	67 дней (377 ч.)
Производственная программа №3	21x70	36 дней (201 ч.)	30 дней (161 ч.)	27 дней (152 ч.)

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что разработанные алгоритмы работают правильно и могут запланировать выполнение производственной программы. Для задач небольшой размерности (пример №1 и №2) алгоритмы показывают одинаковые результаты, причиной этому может быть небольшая вариативность возможных вариантов исполнения производственной программы и практически полное отсутствие очередей на РЦ. В производственной программе №3, в которой была задана более сложная с точки зрения взаимосвязей производственная программа, разработанные алгоритмы показали

результат лучше на 40 и 49 часов, что является практически 20-25 % сокращением общего времени изготовления. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные алгоритмы дают схожие результаты на простых задачах и лучшие результаты на более сложных.

Таким образом, рассмотрен пример разработки математической модели производственного процесса машиностроительного предприятия, выбраны наиболее подходящие алгоритмы оперативно-производственного планирования и проведена их реализация. Апробация показала, что разработанные алгоритмы дают улучшение целевой функции – минимизации общего времени изготовления всех ДСЕ и могут в дальнейшем быть внедрены в систему оперативно-производственного планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с темой и поставленной целью в работе было поставлено шесть задач, требующих решения. Приведем краткие результаты решения поставленных задач.

1. Сформирован образ системы оперативно-производственного планирования, который объединяет в себе модели, методы, инструменты и человека. Определено, что развитие систем оперативно-производственного планирования с достаточной детализацией, с его сложностями и огромными возможностями является наиболее перспективным направлением улучшения оперативного уровня управления машиностроительным предприятием.

2. Проанализированы основные характеристики задач оперативно-производственного планирования. Определено место оперативно-производственного планирования в системе управления машиностроительным предприятием. Задача оперативно-производственного планирования может рассматриваться как задача по принятию решений, в соответствии с этим рассмотрена среда принятия решений в области оперативно-производственного планирования. Представлена основа для принятия решений по оперативно-производственному планированию, использующая двойное представление (открытое / закрытое) исходящее из системного анализа.

3. Проанализированы элементы системы оперативно-производственного планирования. Правильная формулировка достаточно точных моделей планирования производства является одной из основных проблем в области планирования. В рамках моделирования были рассмотрены вопросы конфигурации производства, ограничений и целевых функций моделей. Проанализированы основные проблемы, которые могут возникнуть при моделировании производственных процессов предприятия. Далее представлена классификация одной из конфигураций - "рабочего цеха", как одной из наиболее точно соответствующих реалиям машиностроительных производств. Рассмотрена современная трехсимвольная схема классификации задач оперативно-производственного планирования. Проанализирован процесс построения математических моделей.

При рассмотрении методов представлены основные определения и выделены допущения при определении методов планирования. Далее рассмотрены алгоритмы оперативно-производственного планирования, проведена их классификация и разделение на точные и приближительные, рассмотрены основные алгоритмы. Результатом является общая таблица характеристик алгоритмов, определяющая преимущества, недостатки и вызовы для дальнейшего развития алгоритмов. Точные алгоритмы дают оптимальные решения, но требуют слишком больших затрат времени, в то время как приближенные требуют меньше времени и могут давать решения достаточно приближенные к оптимальным. Также был рассмотрен вопрос интеграции элементов в единую систему.

4. Проанализированы инструменты оперативно-производственного планирования, рассмотрены вопросы удобства систем принятия решений, требования к инструментам планирования. Далее разработаны основные функциональные возможности, которые необходимы для создания инструмента, т.е. общая архитектура инструмента оперативно-производственного планирования.

5. Разработана математическая модель оперативно-производственного планирования реального машиностроительного предприятия. Модель имеет ряд допущений для уменьшения вычислительной сложности.

6. Для решения задачи оперативно-производственного планирования были выбраны два алгоритма: «жадный» и генетический, проведена их разработка. Предусмотрен механизм взаимодействия с информационной системой предприятия. Проведена апробация на трех разных производственных программах с различной сложностью изготавливаемых изделий. На задачах небольшой размерности алгоритмы дают схожий результат, на задачах большой размерности решения получаются лучше на 20-25%. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные алгоритмы дают лучшие результаты, чем имеющиеся на предприятии в настоящий момент. Математическая модель и алгоритмы могут быть использованы в дальнейшем для внедрения в систему оперативно-производственного планирования, позволят эффективнее организовать оперативно-

производственное планирование и сделают процесс принятия решений более гибким и оперативным, повысят качество получаемых решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г. Методология оптимизационных подходов к процессам управления производством в машиностроении // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2017. – №1 (103). ч. 2. – С. 69-77.
2. Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г. Организационно-экономическое моделирование. – СПб.: Издательство Политехнического университета. 2016 – 262 с.
3. Бухалков М. И. Внутрифирменное планирование: учебник. – М.: ИНФРА-М. 2001. – 400 с.
4. Глухов В. В. Организация производства. Бережливое производство: Учеб. Пособие. – СПб.: Издательство Политехнического Университета. 2007. – 238 с.
5. Голдратт Э.М., Кокс Д. Цель. Процесс непрерывного совершенствования. – М.: Попури. 2009. – 496 с.
6. Гончаров В. Н. Оперативное управление производством. (Опыт разработки и совершенствования систем) – М.: Экономика. 1987. – 120 с.
7. Грабауров В. А. Информационные технологии для менеджеров. – М.: Финансы и статистика. 2001. – 368 с.
8. Загидулин Р.Р. Планирование машиностроительного производства: учебник. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 392 с.
9. Кантор Е. Л., Маховиков Г. А., Дрогомирецкий И. И. Планирование на предприятии. – СПб.: Вектор. 2006. – 160 с.
10. Климов А.Н., Оленев И.Д., Соколицын С.А. Организация и планирование производства на машиностроительном заводе: Учебник для машиностроительных вузов. – 3-е изд., переработанное и дополненное / Под ред. С.А. Соколицына. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. 1979. – 463 с.
11. Козловский В.А. Производственный и операционный менеджмент: учебник. – М.: ИНФРА-М. 2003. – 574 с.
12. Краюхин Г.А. Планирование на предприятиях (объединениях)

машиностроительной промышленности: Учебник для ВУЗов по специальности «Экономика и организация машиностроительной промышленности» – М.: Высшая школа. 1984. – 312 с.

13. Крымов С.М. Формирование организационной структуры предприятия на основе учета реляционных взаимодействий // Среднерусский вестник общественных наук. – 2014. – № 6(36). – С. 88-92.

14. Левенцов В.А. Планирование на предприятии машиностроения: учебное пособие. Издание второе, исправленное и дополненное. – СПб.: Издательство Политехнического Университета. 2015. – 136 с.

15. Левенцов В.А., Шнитин Ю.В. Имитационная модель составления календарных расписаний // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2006. – №4(46). – С. 325-331.

16. Летенко В.А., Туровец О.Г. Организация машиностроительного производства: Теория и практика. – М.: Машиностроение. 1982. – 208 с.

17. Львов Ю.А. Оптимизация дискретных моделей производственного планирования. – Л.: Издательство Ленинградского Университета. 1975. – 240 с.

18. Макаров В. М. Оперативное управление бизнес-процессами: Учебное пособие / Под общей ред. Проф. В.В. Кобзева – СПб.: Издательство Политехнического университета. 2007. – 220 с.

19. Мауэргауз Ю.Е. «Продвинутое» планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок. – М.: Экономика. 2012. – 574 с.

20. Никитин А. В. Управление предприятием с использованием информационных систем. – М.: ИНФРА-М. 2007. – 188 с.

21. О дивизионе [Электронный ресурс] // Производственный дивизион холдинга «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ». URL: <http://pd.lpm.spb.ru/> (дата обращения 13.01.18)

22. О холдинге [Электронный ресурс] // Официальный сайт холдинга «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ». URL: <http://lpm.spb.ru/about/> (дата обращения 13.01.18).

23. Петров В.А. Групповое производство и автоматизированное

оперативное управление. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. 1975. – 312 с.

24. Радаев А. Е., Левенцов В. А. Системы поэтапного имитационного моделирования производственных процессов // Организатор производства. – 2011. – № 3(50). – С. 30-33.

25. Смоляр, Л. И. Оперативно-календарное планирование: Модели и методы. – М.: Экономика. 1979. – 136 с.

26. Соколицын С.А., Кузин Б.И. Организация и оперативное управление машиностроительным производством: Учебник для вузов по специальности «Экономика и организация машиностроительной промышленности». – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. 1988. – 527 с.

27. Стивенсов В. Д. Управление производством. – М.: Издательство «Лаборатория базовых знаний», ЗАО «Издательство БИНОМ». 1998. – 928 с.

28. Тютюкин В.К. Математические методы календарного планирования. – Л.: Издательство Ленинградского Университета. 1984. – 196 с.

29. Чейз Р.Б., Эквилайн Н.Дж., Якобс Р.Ф. Производственный и операционный менеджмент. – М.: Издательский дом «Вильямс». 2001. – 704 с.

30. Шнитин Ю.В., Левенцов В.А. Имитационное моделирование календарных графиков производства // Экономика и промышленная политика России. Труды III международной научно-практической конференции. – 2004. – С. 261-267.

31. Юрьев В.Н., Кузьменков В.А. Методы оптимизации в экономике и менеджменте. – СПб.: Издательство Политехнического Университета. 2006. – 804 с.

32. Adams J., Balas E., Zawack D. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. // Management Science. – 1988. – vol. 34(3) – pp. 391—401.

33. Ahmad R., Bath P. A. The Use of Cox Regression and Genetic Algorithm (CoRGA) for Identifying Risk Factors for Mortality in Older People. // Health Informatics Journal. – 2004. – vol. 10. – pp. 221-236.

34. Arroyo J.E.C., Leung J.Y. An effective iterated greedy algorithm for scheduling unrelated parallel batch machines with non-identical capacities and unequal ready times. // *Computers and Industrial Engineering*. – 2017. – vol. 105. – pp. 84-100.
35. Aytuga H., Lawley M.A., McKay K., Mohand S., Uzsoy R. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – №161. pp. – 86-110.
36. Belaid R., T'kindt V., Esswein C. Scheduling batches in flowshop with limited buffers in the shampoo industry. // *European Journal of Operational Research*. – 2012. – vol. 223. – pp. 560-572.
37. Błazewicz J., Lenstra J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. Scheduling Subject to Constraints: Classification and Complexity. // *Discrete Applied Mathematics*. – 1983. – № 5. – pp. 11-24.
38. Brandimarte P., Rigodanza M., Roero L. Conceptual modelling of an object-oriented scheduling architecture based on the shifting bottleneck procedure. // *IIE Transactions*. – 2000. – №32(10). – pp. 921-929.
39. Brooks G. H., White C. R. An algorithm for finding optimal or near optimal solutions to production scheduling problem. // *Journal of Industrial Engineering*. – 1965. – № 16(1). – pp. 34-40.
40. Chaudhry I.A., Khan A.A. A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques // *International Transactions In Operational Research*. – 2015. – vol. 23. issue 3. – pp. 551-591.
41. Che A., Zeng Y., Lyu K. An efficient greedy insertion heuristic for energy conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – vol. 129. – pp. 565-577.
42. Conway R. W., Maxwell W.L., Miller I. W. *Theory of Scheduling*. – Courier Corporation. 2003. – 294 pg.
43. Cox J.F., Schleier J.G. *Theory of constraints handbook*. – New York, NY: McGraw-Hill. 2010. – 1216 pg.

44. Davis L. Job shop scheduling with genetic algorithms. // Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms. – 1985. – pp. 136-140.
45. Falkenauer E., Bouffouix S. A genetic algorithm for job shop. // In IEEE international conference on robotics and automation. – 1991. – pp. 824–829.
46. Fnaiech N., Hammami H., Yahyaoui A., et al. New Hopfield neural network for joint job shop scheduling of production and maintenance. // In IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2012. – pp. 5535-5541.
47. Fonseca D. J., Navarrese D. Artificial neural networks for job shop simulation. // Advanced Engineering Informatics. – 2002. – vol.16(4) – pp.241-246.
48. Gilbert S. W. Model-building and a definition of science. // Journal of Research in Science Teaching. – 1991. – №28. – pp. 73-79.
49. Godin V. Interactive scheduling: Historical survey and state of the art. // AIIE Transactions. – 1978. – №10. – pp. 331-337.
50. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley. 1989. – 432 pg.
51. Graham R. L., Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey. // Annals of Discrete Mathematics. – 1979. – №5. – pp. 287-326.
52. Hefetz N., Adiri I. An efficient optimal algorithm for the two-machines unit-time jobshop schedule-length problem. // Mathematics of Operations Research. – 1982. – no.7(3). – pp. 354–360.
53. Higgins P.G. Architecture and Interface Aspects of Scheduling Decision Support. Human Performance in Planning and Scheduling. – CRC Press. 2014. – 480 pg.
54. Hoitomt D. J., Luh P.B., Pattipati K.R. A practical approach to job shop scheduling problems // IEEE Trans. on Robotics and Automation. – 1993. – vol. 9 no. 1 – pp. 1-13.
55. Hyer N., Wemmerlöv U. Reorganizing the Factory: Competing Through Cellular Manufacturing. – Productivity Press. Portland. 2002. – 874 pg.

56. Ingimundardottir H., Runarsson T. P. Supervised learning linear priority dispatch rules for job-shop scheduling. // Coello C.A.C. (eds) Learning and Intelligent Optimization. – 2011. – Lecture Notes in Computer. – pp. 263-277.
57. Irani S. A. Handbook of Cellular Manufacturing Systems. – John Wiley & Sons. New York. 1999. – 762 pg.
58. Jain A. S., Meeran S. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. // European Journal of Operational Research. – 1999. – vol. 113 issue 2. – pp. 390-434.
59. Johnson S.M. Optimal Two and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included // Naval Research Logistics Quarterly. – 1954. – Vol. 1 no. 1 – pp. 61-67.
60. Ju Q. Y. Planning and scheduling optimization of job-shop in intelligent manufacturing system: Doctoral dissertation / Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. – Nanjing. China. – 2007.
61. Kempf K., Uzoy R., Smith S.P., Gary K. Evaluation and comparison of production schedules // Computers in industry. – 2000. – №42. – pp 203-220.
62. King J. R. The Theory Practice Gap in Job Shop Scheduling // Production Engineering. – 1976. – vol. 5 – pp. 138-143.
63. Kirchmer M. Business Process Oriented Implementation of Standard Software. – Springer. Berlin. 1999. – 233 pg.
64. Kurbel K. E. The making of Information Systems. – Springer. Berlin. 2008. – 591 pg.
65. Lal V., Deva Durai C. A. A Survey on Various Optimization Techniques with Respect to Flexible Job Shop Scheduling // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2014. – vol. 4. issue 2. – pp. 359-365.
66. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. // Econometrica. – Vol. 28. No. 3. – 1960. – pp. 497-520.
67. Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity. // Logistics of Production and Inventory. – Vol. 4

of Handbooks in Operations Research and Management Science. – 1993. – Amsterdam. – Elsevier Science Publishers. – pp. 445-522.

68. Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Complexity of Scheduling under Precedence Constraints. // *Operations Research*. – 1978. – № 26(1). – pp.22-35.

69. Lian L., Mesghouni K. Comparative study of heuristics algorithms in solving flexible job shop scheduling problem with condition based maintenance. // *Journal of Industrial Engineering and Management*. – 2014. – vol. 7(2). – pp. 518-531.

70. Lin L., Hao X. C., Gen M., et al. Network modeling and evolutionary optimization for scheduling in manufacturing. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2012. – №23(6). – pp. 2237-2253.

71. Lomnicki Z. A. A «branch-and-bound» algorithm for the exact solution of the three-machine scheduling problem. // *Journal of the Operational Research Society*. – 1965. – №16(1). – pp. 89-100.

72. Manne A. S. On the job-shop scheduling problem. // *Operations Research*. – 1960. – № 8(2). – pp. 219–223.

73. Mayer R. E. Knowledge and thought: Mental models that support scientific reasoning. // *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*. – 1992. – pp. 226-243.

74. McKay K.N., Safayeni F.R., Buzacott J.A. Job-Shop Scheduling Theory: What Is Relevant? // *Interfaces*. – №18. – 1988. – pp. 84-90.

75. McMahon G., Florian M. On scheduling with ready times and due dates to minimize maximum lateness. // *Operations Research*. – 1975. – no. 23(3). – pp. 475–482.

76. Morton T. E., Pentico D. W. Heuristic Scheduling Systems With Applications to Production Systems and Project Management. – John Wiley & Sons. Hoboken. 1993. – 695 pg.

77. Nahmias S., Olsen T.L. *Production and Operations Analysis*. – Waveland Press. 7th edition. 2015. – 820 pg.

78. Nawaz M., Ensore E. E., Ham I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. // *Omega*. – 1983. – vol. 77(1). – pp. 91-95.

79. Paul M., Sridharan R., Ramanan T. R. A multi-objective decision-making framework using preference selection index for assembly job shop scheduling problem. // *International Journal of Management Concepts and Philosophy*. – 2016. – vol. 9(4). – pp. 362-387.
80. Pinedo M.L. *Scheduling. Theory, Algorithms and Systems*. – Springer International Publishing. 5th edition. 2016. – 670 pg.
81. Pinson, E. The job-shop scheduling problem: A concise survey and some recent developments. // *Scheduling Theory and its Applications*. – Wiley. – 1995 – pp. 277-293.
82. Plenert G., Kirchmier B. *Finite capacity scheduling: management, selection, and implementation*. – Oliver Wight Manufacturing Publications. 2001. – 251 pg.
83. Porter K., Little D., Peck M., Rollins R. *Manufacturing classification: relationships with production control systems* // *Integrated Manufacturing Systems*. – 1999. – №10. – pp 189-199.
84. Portugal R. Production scheduling theory: just where is it applicable. // *Interfaces*. – №30. – 2000. – pp. 64-76.
85. Reiss M. *Komplexitätsmanagement*. // *Das Wirtschaftsstudium*. – 1993. – № 22. – pp. 54-60.
86. Rinnooy Kan A. H. G. *Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations*. – Martinus Nijhoff. Hague. 1976. – 190 pg.
87. Rosenkrantz D. J., Stearns R. E., Lewis P. M. I. I. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. // *SIAM Journal on Computing*. – 1977. – vol. 6 (3). – pp. 563-581.
88. Sadeh N. *Micro-opportunistic scheduling: the micro-boss factory scheduler* // *Expert Systems With Applications*. – №6. – pp 377-392.
89. Stoop P.P.M. The complexity of scheduling in practice // *International journal of operations and production management*. – №16. – 1996. – pp. 37-53.
90. Vollmann T.E., Berry W.L., Whybark D.C., *Manufacturing Planning and Control Systems*. – Irwin/McGraw-Hill. 4th edition. 1997. – 836 pg.

91. Wagner H. M. An integer linear programming model for machine scheduling. // Naval Research Logistics Quarterly. – 1959. – №6(2). – pp. 131-140.
92. Werner R., Winkler A. Insertion techniques for the heuristic solution of the job shop problem. // Discrete Applied Mathematics. – 1995. – vol. 58(2). – pp. 191-211.
93. Wojakowski P., Warzolek D. Research Study of State-of-the-Art Algorithms for Flexible Job-Shop Scheduling Problem // Technical Transactions, Mechanics. – 2013. – Vol. 1-M. – pp. 381-388.
94. Zahmani M. H., Atmani B., Bekrar A. Multiple priority dispatching rules for the job shop scheduling problem. // 2015 3rd international conference on control, engineering and information technology (CEIT). – 2015. – pp. 1-6.