ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»

На правах рукописи

ПЛАТОНОВ

Дмитрий Евгеньевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИСТЕМНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 2.5.22. – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор А. В. Архипов

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1 ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФАКТОР РОСТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 18

1.1 Состояние производственной базы промышленных предприятий и проблема управления технологическим развитием производственных объектов 18

1.2 Производительность оборудования – ключевой фактор эффективности производственной деятельности 23

1.2.1 Структуризация и оценка производительности технологических ресурсов 23

1.2.2 Методика оценки эффективности оборудования (ОЭО): критический анализ 30

1.2.3 Проблема оценки производительности многомашинных технологических систем. Базовые и сводящиеся к ним структуры. Технологические сети 34

Выводы по главе 1 43

2 МОДЕЛИ ПОТОКОВ РАБОТ И ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН 45

2.1 Потоки работ в производствах дискретного и непрерывно-дискретного типов 45

2.2 Производительность технологической машины при обработке многопродуктового потока 52

2.3 Преобразование технологическим звеном входного потока продуктов ... 57

Выводы по главе 2 59

3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКОВ ПРОДУКТОВ 61

3.1 Структурная модель технологической сети. Метод оценки максимального потока на основе теоремы Форда-Фалкерсона 61

3.2 Метод и алгоритм оценки производительности сети с использованием компьютерного моделирования 70

однопродуктового потока работ 70

3.3 Метод и алгоритм оценки производительности сети с использованием компьютерного моделирования многопродуктового потока работ 77

3.4. Объемное планирование загрузки технологических сетей с использованием цифровой модели потоков работ 83

Выводы по главе 3 92

4 АДАПТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧКИЕ СЕТИ: РЕЗЕРВЫ РОСТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ 93

4.1. Концепция адаптивных технологических сетей. Общая схема адаптации системы к требованиям производства 93

4.2 Модель и метод оптимальной коррекции производительности звеньев технологической сети 99

4.3. Модель и метод оптимизации структуры технологической сети 121

4.4 Пример применения процедуры адаптации технологической сети в условиях цеха механообработки 129

Выводы по главе 4 135

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 137

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 139

ПРИЛОЖЕНИЯ 153

Приложение 1. Содержание этапов и пример применения алгоритма коррекции производительности оборудования в сети по методу частичного перебора 153

Приложение 2. Пример моделирования движения многомерного потока через технологическую сеть 158

Приложение 3. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ 162

Приложение 4. Копии документов, подтверждающих практическое использование результатов диссертации на предприятиях машиностроения 165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Задачи социального развития и обеспечения безопасности страны могут быть решены только на прочном фундаменте растущей и эффективной экономики. В этой связи постоянной целью экономической деятельности, в том числе в ее важнейшей составляющей – в сфере промышленного производства является повышение полезного результата в виде выпуска современной высококачественной продукции, приходящегося на единицу затраченных ресурсов, т.е. повышение производительности. Известен теоретический постулат, выдвигающий на первое место производительность труда. Средством, обеспечивающим рост этого показателя, наряду с прочими факторами, выступает рост производительности технологических ресурсов, прежде всего, технологического оборудования. Именно развитие производственно-технологической базы, находящее отражение в смене технологических укладов, обусловленной действием в различные исторические периоды разных научно-технических достижений, определяло и определяет уровень общественной производительности труда. В настоящее время таким достижением, находящим расширяющееся использование во всех направлениях общественной деятельности, являются цифровые технологии. Эти технологии обеспечивают качественно новый уровень производительности, открывая возможность создания продуктов с новыми потребительскими свойствами, высвобождая работников в сфере производства и управления.

На фоне создания новой техники и технологии, активного стимулирования со стороны правительства их применения остается важной задача эффективного использования, действующего парка оборудования, повышения его отдачи. Такое положение позволяет считать важными и актуальными задачи оценки, анализа и повышения производительности

действующего оборудования, в том числе, многомашинных технологических систем, за счет реализации рациональных организационно-технических мероприятий, обеспечивающих получение системного положительного эффекта. Наряду с техническими аспектами проблемы имеет большое значение организационный аспект, связанный, в первую очередь, с эффективным использованием многомашинных технологических систем – особых объектов организации производства. При наличии разработок, в основном общего экономического характера, многие организационно-технические вопросы данного направления проработаны недостаточно. В частности, слабо освящены вопросы оценки производительности многомашинных систем, в которых отдельные переходы (машины, установки) объединены разнообразными организационными и технологическими связями. Это послужило основанием для выбора темы диссертации.

Степень разработанности научной проблемы. Исследование производительности как ключевого фактора экономического развития восходит к фундаментальным трудам классиков политической экономии и экономической теории (А. Смит, А. Маршалл, К. Маркс и др.). Развитием теории технологических укладов, смена которых сопровождалась скачкообразным ростом производительности, а также общими вопросами экономического развития занимались современные ученые (С. Глазьев, С. Губанов, Д. Галимов, В. Дасковский, В. Киселев В., А. Корнев, Т. Курбанов, В. Москвин, О. Сухарев и др.). Проблемам повышения эффективности производства, в том числе, на основе моделирования процессов и роста производительности оборудования, посвящены работы многих специалистов в области прикладной экономики и организации производства. Среди них такие ученые, как Бездудный Ф.Ф., Павлов А.П., Первозванский А.А., Пирогов К.М., Татевосов К.Г. Танаев В.С., Шкурба В.В. и многие другие, в том числе, зарубежные авторы. В смежных областях экономики выполнено большое число исследований, нацеленных на рост эффективности, и поэтому

затрагивающих проблематику роста производительности. Это работы Ананичева Д.А., Архипова А.В., Богданова А.И., Лазариди С.К., Макарова А.Г., Мишенина О.А., Никитиной Л.Н., Пархоменко Ю.В., Переборовой Н.В., Рожкова Н. Н., Сиротиной Л.К., Сошникова А.В., Титовой М.Н., Ястребова А.П. и многих других. При значительном количестве публикаций и широком спектре исследований ряд вопросов управления производительностью многомашинных технологических систем с использованием компьютерных моделей и методов проработаны не полностью. Такие направления исследований как сетевое планирование и управление, теория массового обслуживания, теория расписаний, теория графов рассматривают сетевые структуры, но ориентируются на иные цели и, соответственно, используют другие подходы. Модели и методы оценки и управления производительностью многомашинных систем с учетом специфики их структур разрабатываются в данной диссертационной работе.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка и научно-практическое развитие методов оценки и повышения производительности многомашинных технологических комплексов и сетей, характерных для предприятий (цехов, участков) с мелкосерийным типом и широкой номенклатурой изделий, на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов.

Научные задачи исследования:

1. Выполнение анализа технологических ресурсов предприятий; обоснование выделения технологических сетей как вида многомашинных технологических систем и особого объекта организации производства.

2. Разработка математических моделей потоков работ и процессов их преобразования при прохождении через звено технологической сети.

3. Разработка методов оценки производительности технологической сети на стадии планирования, организации и оперативного управления производственным процессом.

4. Разработка моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ для задач повышения производительности сети на основе системной оптимизации, как режимов работы оборудования, так и параметров потоков работ.

Объектом исследования являются производственные цеха и участки предприятий машиностроения и других отраслей промышленности с дискретным, мелкосерийным типом производства, широкой номенклатурой, частой сменой изделий, разнообразием технологических маршрутов.

Предметом исследования являются методы оценки и повышения производительности технологических систем как фактора роста эффективности производства.

Методология и методы исследования. Применены принципы системного подхода, положения теории управления производством, методология математического описания и компьютерного моделирования задач оценки производительности оборудования в составе многомашинных систем, методы оптимизации производственных процессов, методы оценки эффективности производственной деятельности.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.22. – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства, и в части, относящейся к организации производства, пунктам 1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства;

21. Развитие теоретических основ и практических приложений организационно-технологической надежности производственных процессов. Оценка уровня надежности, адаптивности и устойчивости производства;

25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Научная новизна результатов исследования заключается в разработке нового подхода к описанию многомашинных систем и потоков продуктов в них, в создании математических и компьютерных моделей, методов и алгоритмов оценки производительности технологических сетей, оптимизации их параметров по критериям роста эффективности производства.

Наиболее существенные результаты, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем (в скобках указаны пункты паспорта специальности):

1. Выделен класс многомашинных систем, в которых организационно-технологические связи между технологическими установками образуют сетевую структуру, но **в отличие** от аналогичных структур, рассматриваемых в сетевом планировании, теории массового обслуживания, теории расписаний, соответствующих разделах теории графов, не являются жесткими и определяются переменной по составу совокупностью маршрутов перемещения работ в процессе производства; также **в отличие** от указанных теорий, оперирующих, как правило, календарными сроками выполнения работ, сформулирована применительно к выделенному объекту задача оценки производительности системы (пункт 1).

2. Разработаны математические модели одно- и многопредметных потоков работ, которые, **в отличие** от моделей, принятых в календарном планировании, оперируют усредненными характеристиками на обоснованно выбранных интервалах оценки производительности машин; разработана модель технологической установки, выполняющей преобразование входного потока продуктов, отражающая особенности организации функционирования различных видов обрабатывающего оборудования (пункт 1).

3. Разработаны методы оценки производительности технологической сети на стадии планирования и организации производства, а именно,

- теоретически обоснованный метод оценки максимально достижимой производительности технологической сети по величине «максимального потока», определяемой с использованием понятия разреза графа и теоремы Форда-Фалкерсона; метод, учитывает специфику технологической сети и **отличается** от известного алгоритма логической простотой и меньшей трудоемкостью (пункт 25);

- методы, алгоритмы и компьютерные программы оценки производительности технологической сети при обработке одно- и многопродуктовых потоков на основе компьютерной имитации прохождения через сеть потоков различных продуктов по заданным правилам их маршрутизации, **развивающие** подходы, принятые в известных универсальных средствах имитационного моделирования (пункт 25).

4. Разработаны модели, методы, алгоритмы и компьютерные программы для задач параметрической и структурной адаптации технологической сети с использованием для коррекции уровней производительности машин и выбора маршрутов движения потоков процедур, обеспечивающих при их согласованной работе в циклическом режиме реализацию принципов адаптивности и системной оптимизации производственного процесса. В алгоритмах использованы новые способы организации вычислительных процедур, **дополняющие** известные приемы сокращения объема перебора вариантов при поиске решений, близких к оптимальным (пункты 1, 21, 25).

Теоретическая значимость диссертации состоит в теоретическом обосновании подхода к решению задач оценки и повышения производительности, как отдельных машин, так и многомашинных систем с различной структурой. В рамках принятого подхода получены следующие теоретические результаты:

- сформулированы условия применения для анализа технологических сетей аппарата теории графов; теоретически обоснован алгоритм определения максимального потока через технологическую сеть с использованием теоремы Форда-Фалкерсона;

- при разработке методов параметрической адаптации введены понятия состояний (режимов) полной и условной сбалансированности сети; сформулированы формальные условия их достижимости при коррекции уровней производительности звеньев сети;

- при разработке методов адаптации при проектировании структуры сети предложены приемы формирования допустимых маршрутов движения различных потоков в сети и оценки их предпочтительности, а также приемы сокращения объема перебора вариантов при поиске решений.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке моделей, методов и компьютерных программ, позволяющих формулировать и решать в составе производственных информационных систем следующие практические задачи, характерные для рассматриваемых типов предприятий:

- задачи оценки производительности технологической сети на стадиях оперативного планирования и организации производства с расчетом ожидаемой эффективности производственного процесса;

- задачи оптимальной маршрутизации движения потоков продуктов через технологическую сеть на стадии оперативного формирования ее структуры;

- задачи целенаправленной коррекции (адаптации) параметров оборудования сети (производительности машин) и характеристик потоков продуктов (объемов партий и маршрутов их движения в сети) для повышения эффективности производства.

Применение предложенных инструментов в условиях производственного центра СПб ГБПОУ «Академия машиностроения имени Ж.Я. Котина» позволило за счет роста производительности сократить затраты

на функционирование технологической сети цеха механообработки на 10-35% (в зависимости от состава производственных заданий). Результаты исследования в виде методик оценки и коррекции производительности машин приняты к использованию в практике организации производства на предприятиях ООО «Мехпромпроцесс», ООО «Северный технопарк», ООО «НПК «Антей», ООО «МКОД».

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели многомашинных технологических сетей с развитой структурой связей, как особых объектов организации, отличающихся спецификой оценки производительности, обусловленной сетевыми эффектами.

2. Модели одно - и многопредметных потоков работ, ориентированных на оценку производительности сети; структурная и математическая модель технологической машины как звена сети.

3. Методы оценки производительности технологической сети на стадии планирования и организации производства, в том числе, метод предельной оценки производительности сети по величине «максимального потока», учитывающий специфику технологической сети; методы и алгоритмы, имитирующие движение потоков по оборудованию сети и позволяющие прогнозировать значения ряда показателей, характеризующих эффективность функционирования сети.

4. Введение понятия «адаптивная технологическая сеть» и ряда смежных понятий; определение содержания задач, методов и алгоритмов параметрической и структурной адаптации технологической сети, реализующих циклическую процедуру поиска оптимальных по общему (системному) критерию уровней производительности звеньев сети и ее структуры путем выбора маршрутов движения потоков.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов обеспечивается корректным применением

математических методов, использованием компьютерных программ, прошедших государственную регистрацию, соответствием результатов расчетов данным логического анализа. Основные результаты исследования были доложены и обсуждались на международных научно-практических конференциях (Москва, 2022; Уфа, 2022(3); Москва,2023(2); Новосибирск,2023).

Публикации. Результаты исследования представлены в 14 публикациях общим объемом 8,9 п. л., личный вклад автора − 7.9 п. л., в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК (категория К2), и 3 Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 100 наименований, и приложения. Основной текст диссертации изложен на 138 страницах, содержит 13 таблиц и 29 рисунков.

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, дана оценка проработанности темы, сформулированы цель и научные задачи диссертации, указано соответствие темы паспорту специальности, приводятся положения, которые, по мнению автора, имеют признаки научной новизны, дана краткая характеристика содержания работы.

В первой главе «Повышение производительности технологических систем как фактор роста эффективности промышленных предприятий» приводятся данные о состоянии производственной базы предприятий в различных отраслях промышленности, свидетельствующие о наличии проблем с обеспечением требуемого качества продукции и эффективности деятельности вследствие значительной доли устаревшего оборудования, трудностями обновления парка технологических машин, обусловленных финансовыми, организационными и политическими факторами. Приведенные данные дали основание для вывода о важности и актуальности разработки методов оценки и повышения производительности действующих

технологических систем. В главе проводится мысль о том, что адекватными критериями качества работы могут быть показатели, основанные на оценках производственных возможностей соответствующей системы (предприятия, структурного подразделения). Базу таких оценок составляют оценки производительности многомашинных систем, зависящие не только от показателей отдельных единиц оборудования, но также от многих организационных факторов и «системных эффектов». Такое положение повышает значимость оценок производительности как ключевого фактора эффективности деятельности.

Для более детального анализа данного фактора в главе рассмотрен ряд конкретных вопросов. Проведена структуризация технологических ресурсов предприятия, в результате которой выделены такие объекты как отдельные машины, технологические комплексы, технологические сети. Эти технологические объекты в совокупности с соответствующей организационно-технической инфраструктурой, обеспечивающей их функционирование, составляют технологическую среду предприятия. Одно из формулируемых положений состоит в необходимости при планировании развития производства использовать системный подход, обеспечивающий сопряженность всех частей технологической среды. Одним из направлений в достижении этой цели является обеспечение сопряженности машин как звеньев технологической сети по показателям производительности. Решение этой задачи предполагает оценку эффективности использования оборудования. В главе рассмотрена одна из известных методик получения такой оценки, а именно, методика общей оценки эффективности оборудования (ОЭО), или OEE − “Overall Equipment Effectiveness”. Отмечены положительные свойства и недостатки этой методики, в частности, отсутствие в ней инструментов для оценки эффективности многомашинных систем. В главе подчеркивается важная роль многомашинных комплексов, в оценке производительности которых возникают особые затруднения из-за нарушений

сопряженности машин при обработке различной номенклатуры продукции, что характерно для мелкосерийного производства. Внимание уделено относительно простым структурам, названным базовыми. Такие структуры изучались ранее и для них известны способы оценки производительности, основанные на простых преобразованиях, сводящих исходные структуры к эквивалентным по производительности звеньям. Выделен вид структур многомашинных систем, не допускающих такие преобразования. В данной работе они именуются технологическими сетями.

Во второй главе «Модели потоков работ и оценки производительности технологических машин» рассматривается подход к описанию потоков предметов труда (продуктов), проходящих последовательную обработку на машинах технологического комплекса или сети согласно установленным технологическим маршрутам. Подход базируется на использовании усредненных характеристик потоков и ориентирован на расчет оценок производительности, как отдельных машин, так и многомашинных систем как целостных объектов. Потоки представляются как регулярные последовательности партий продуктов равного объема, перемещающиеся по машинам в дискретные моменты времени. Интервал между смежными моментами времени назван «тактом модели» или, для краткости, просто тактом. Величина такта выбирается согласованно с периодом, на котором производится оценка производительности оборудования. В отличие от моделей календарного планирования, в которых учитываются длительности обработки видов продуктов и другие временн*ы*е параметры, влияющие на динамику движения потоков в производстве, в принятом подходе многопродуктовые (многопредметные) потоки описываются усредненными характеристиками на интервалах, равных такту. Таким образом, принято предположение, что в отсутствие операций ветвления и сборки поток, объединяющий несколько видов предметов труда («продуктов»), не меняет своей структуры на интервалах, равных такту. Такой подход позволяет с

помощью относительно простых процедур получить обобщенные оценки производительности технологических сетей с произвольной структурой. Такие процедуры рассматриваются в следующей главе.

В данной главе рассматриваются также вопросы обобщенной оценки производительности машины при обработке многопродуктового потока в случае, когда нормы производительности различаются для отдельных видов продуктов. Глава завершается описанием модели преобразования потока работ в технологическом звене при характерной для мелкосерийного производства организации загрузки машин. Особенностью модели является выделение в структуре звена двух частей: функционального блока и накопителя. В накопитель попадает часть партии продукта на входе звена, превышающая его производительность. В модели также принято, что передача предметов труда с выхода машины на следующую по маршруту машину происходит в очередном такте при этом объем передаточной партии равен выходному объему. Модели оценки производительности сетей, рассмотренные в следующих главах, используют данную модель звеньев.

В третьей главе «Методы оценки производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования движения потоков продуктов» излагаются модели и алгоритмы получения оценок производительности сетей при обработке ими одно- и многопродуктовых потоков. Предварительно рассмотрены особенности технологических сетей, отличающие их от других видов сетей, традиционно изучаемых в соответствующих разделах теории графов, как основного инструмента моделирования и анализа таких объектов. Отмечены основные отличия: формирование структуры сети в зависимости от установленных маршрутов потоков и привязка производительности (аналог «пропускной способности») к вершинам модельного ориентированного графа, а не к его дугам, как это принято в большинстве постановок задач. Показано, что верхней оценкой объема продуктов, проходящих через сеть при полной загрузке машин и сбалансированности объемов на их входах и выходах, может

служить величина максимального потока через данную сеть. Для потоков с произвольной размерностью (одно - и многопродуктовых) предложены алгоритмы расчета производительности, имитирующие перемещение партий продуктов по машинам сети в соответствии со своими технологическими маршрутами. Использование описанных ранее моделей звеньев, включающих накопители, позволяет в результате имитации движения потоков устанавливать также профили запасов продуктов в звеньях и уровни использования их производственных возможностей. Эти данные необходимы для выбора направлений повышения производительности звеньев с целью роста эффективности сети в целом.

В четвертой главе «Адаптивные технологические сети: резервы роста производительности» предложена концепция построения адаптивных технологических сетей, развивающая идеологию гибких производственных систем. Основная идея концепции состоит в возможности корректировать в целях повышения конечных показателей эффективности производства как параметры сети, а именно, уровни производительности ее звеньев, так и маршруты движения потоков, определяющих структуру сети. Возможности такой коррекции обеспечиваются и ограничиваются, с одной стороны, пределами технически и/или организационно допустимых изменений производительности машин, с другой стороны, наличием (или отсутствием) для отдельных видов продуктов различных маршрутов движения при их обработке в рассматриваемой сети, в частности, основных и резервных. Введены понятия параметрической и структурной адаптации сети. Предложена общая схема процесса адаптации. Разработаны алгоритмы коррекции производительности звеньев (параметрическая адаптация сети) по критерию минимума суммарных потерь из-за неполного использования производительности машин и образования сверхнормативных запасов продуктов в накопителях. Предложены две схемы построения алгоритмов. Одна из них базируется на идее ограниченного перебора сочетаний

допустимых уровней производительности звеньев. Другая схема базируется на введенных понятиях полной и условной сбалансированности сети и использует процедуру последовательных расчетов, обеспечивая поиск значений показателей, при которых запасы равны установленным нормативам. В этом случае найденные значения производительности (они названы «идеальными») могут оказаться технически не реализуемыми, и требуется их коррекция путем замены подходящими допустимыми значениями.

В **Заключении** приведены выводы и рекомендации, сформулированные по результатам исследования.

В **Приложении** изложены пояснения к основным алгоритмам решения задач управления производительностью машин в сети с примерами применения, а также приведены документы, подтверждающие государственную регистрацию компьютерных программ и практическое использование результатов исследования на предприятиях машиностроения.

В диссертации при изложении некоторых разделов, содержащих описания алгоритмов с использованием различных формул, использованы материалы, опубликованные в собственных статьях автора либо в соавторстве с научным руководителем. Статьи указаны в списке литературы под номерами [60]-[68]. Дополнительно эти источники заимствования фрагментов текста указаны и в соответствующих разделах диссертации.

1 ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФАКТОР РОСТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1 Состояние производственной базы промышленных предприятий и проблема управления технологическим развитием производственных объектов

Решение задач социального развития и обеспечения безопасности страны возможно только на прочном фундаменте растущей и эффективной экономики. В свою очередь, достижение устойчивого экономического роста зависит от многих факторов, таких, в частности, как принятые концепции экономической, финансовой, кредитной, промышленной политики, качество менеджмента, нацеленного на инновационное поступательное движение всей экономической системы. Среди всех факторов, влияющих на темпы экономического роста и экономическую эффективность деятельности на любом уровне, правомерно выделить в качестве ключевого, базового фактора *достигнутый уровень применяемых производственных технологий.* В рамках разных течений и школ в экономической теории исследование уровня и динамики производительных сил на разных этапах развития общества, в конечном счете, приходит к оценке характеристик используемых технологий. Можно утверждать, что направление и динамика *технологического развития* предопределяет и экономическое развитие, формирующее потенциал для решения задач во всех сферах – социальной, культурной, научно-технической, военной, экологической … Роль технологического развития и растущее влияние информационных технологий указывается в большом количестве публикаций, в частности, в [23], [30], [31], [35], [44], [73], [76], [92] и др.

Ключевое значение технологии подкрепляется как теоретическими разработками, так и практикой анализа развития экономики различных стран.

Общепризнанным в экономической литературе является периодизация экономического и общественного развития по *технологическим укладам* (см. [47], [50], [76]). Создание и широкомасштабное использование техники и технологии более высокого уровня влечет и достижение новой ступени в экономическом развитии соответствующего сообщества. По оценкам экспертов производственная база России соответствует IV технологическому укладу с отдельными элементами V уклада [47]. В то же время в экономически развитых странах считается прочно достигнутым VI технологический уклад. Это обеспечивает превосходство этих стран по важнейшему экономическому показателю – производительности труда. В отдельных отраслях различия в значениях этого показателя не одинаковы. Но усредненные значения производительности труда (выработка продукции в час) различаются весьма существенно – в 17,5 раза [23], [69]. Такое положение, очевидно, в ближайшей исторической перспективе должно быть изменено в результате целенаправленных усилий, что актуализирует решение задач технологического развития отраслей российской промышленности высокими темпами в соответствии с мировыми тенденциями. Достигнутый в различных странах уровень технологий является предметом оценки и анализа на различных уровнях, в том числе на уровне ООН (комиссия ООН по промышленному развитию ЮНИДО). В Отчете ЮНИДО (2020) подчеркивается роль технологий в обеспечении прогресса и отмечается, что в рассматриваемый период имеет место четвертая волна технологического прогресса [21], [22]. Предыдущие «волны» базировались последовательно на использовании паровых машин, электричества, компьютеров. На четвертой волне базовыми стали автоматизированные системы на базе цифровых технологий, внедряемые во всех видах деятельности, в частности, в индустрии, что имеет ключевой значение для общего прогресса. На этом уровне речь идет о «передовых цифровых производствах» (ADP), «умных производствах», киберфизических системах с поддержкой искусственного

интеллекта (CPS). В отчете ЮНИДО подчеркивается роль новых (цифровых) технологий: «промышленная конкурентоспособность, в конечном счете, зависит от технологической модернизации». Новые технологии выступают как «мультипликаторы промышленного развития за пределами производственного предприятия» [22, с. 15–42]. Признаки технологии, соответствующей четвертой волне прогресса, соотносятся с получающей распространение концепцией промышленного развития «Industry 4.02» [21].

Публикуемые в литературе данные о масштабах и тенденциях перехода к широкому использованию цифровых технологий позволяют сделать вывод об их исключительной роли в прогрессивном развитии промышленности. Развитию цифровых технологий в русле мировых тенденций уделяется значительное внимание и в России [37], [41], [73]. Показательным является введение государственных стандартов для цифровой промышленности (см. [1]).

При решении реальных задач по совершенствованию технологий на предприятиях любых отраслей признаком прогрессивности действующих и предлагаемых к внедрению (инновационных) технологий следует считать их уровень автоматизации на базе цифровых устройств, выполняющих функции операционной обработки, управления операциями, обеспечения информационных связей между операциями и формирования интегрированных производственных систем. При этом следует подчеркнуть, что автоматизация не является конечной целью, а выступает в роли главного средства повышения технической и экономической эффективности производства. Под технической эффективностью здесь понимается получение продуктов, более совершенных по своим техническим характеристикам, чем могут обеспечить традиционные (ручные, механизированные, частично автоматизированные) технологические процессы [34].

Проблемы содержания и практической реализации концепции цифровых технологий и цифровой экономики весьма широко освещаются в

научной литературе. Вопросы цифровой трансформации экономики тесно соединяются с более общими вопросами, относящимися к проблематике инновационного развития в целом [7], [12], [20], [26], [28], [31], [59]. Это закономерно, так как цифровые технологии представляют собой класс технологических инноваций, с которыми связываются особые надежды в качественном позитивном изменении не только экономики, но в целом жизни общества.

В настоящее время фактором, сдерживающим темпы роста экономики, являются критически низкие темпы обновления активной части основных фондов на российских предприятиях и, как следствие, ускоряющаяся деградация машин и оборудования, как в физическом, так и в моральном отношении. Несмотря на значительные усилия по обновлению производственной базы промышленности, проблему нельзя считать решенной. Как отмечается в [24], в промышленно развитых странах за период 1970-2018 гг. завершено шесть воспроизводственных циклов (комплексная инновационная замена активной части основных фондов в среднем каждые 8 лет). В России реализован за этот период один такой цикл, причем не более, чем на 15% [24]. Такое положение влечет и многократное («катастрофическое», по мнению авторов статьи [24]) отставание в производительности труда. Но не только в этом. Сокращаются возможности расширения ассортимента и качества продукции. Российские товары теряют конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынке [25]. Такое положение в особом ракурсе представляет проблему внедрения новейших цифровых технологий: почти очевидной становится нецелесообразность во многих случаях «поддерживающих» инвестиций в старые технологии на отдельных локальных участках производственных процессов. В то же время реализация комплексных проектов замены технологий в производственных цепочках подавляющему большинству предприятий не по силам. Причины такого положения специалисты связывают с факторами экономического и

финансового характера – недостатком собственных средств, высокой стоимостью кредита, трудностями его получения [26]. Следует также указать, что на рынке машин и оборудования слабо представлены отечественные производители, а цена импортного оборудования для большинства предприятий традиционных отраслей чрезмерно высока и постоянно дорожает из-за инфляции. В сложных политических условиях 2021-2024 гг. многие импортные технологии и оборудование стали недоступными для отечественных предприятий из-за санкций [51]. Проявляются и внутренние экономические причины. В частности, действующая политика амортизации активной части основных фондов не позволяет накопить достаточно средств для полномасштабной замены устаревшего парка оборудования за период его эксплуатации («паралич обновления» [24]). Как отмечают авторы статьи [24], «объем отложенных за 25 лет инвестиций в инновационное техническое перевооружение предприятий устрашает своей величиной – это 5–7 трлн. долл.» [24, с. 34-53]. Недостаточный инвестиционный потенциал большинства предприятий не позволяет им решить назревшую проблему инновационной технологической модернизации [26]. Отмеченные проблемы с годами усугубляются: по данным, приведенным в [26], в 2000 г. 41% предприятий указали в качестве своей цели внедрение новых технологий; в 2016 г. таких предприятий стало заметно меньше – всего 32%. ([26, с.37].

Приведенные данные показывают, что проблема технологического развития отечественных предприятий стоит чрезвычайно остро и требует комплексного решения. В сложившихся условиях обострившегося с начала XXI века противостояния России и «коллективного запада», приведшего к нарастанию влияния внеэкономических факторов на нормальные экономические отношения между странами, требуется не только возродить на современном уровне производство средств производства, но обеспечить темпы обновления активной части основных фондов, превышающие мировые показатели. С очевидностью возрастает роль выработки и реализации,

обновленной экономической и промышленной политики на всех уровнях экономической системы (см., в этой связи, [99]). К числу важных и актуальных вопросов относится и разработка мер, направленных на рациональное использование ограниченных средств, вкладываемых в поддержание и развитие технологий, с тем, чтобы обеспечить достижение как оперативных, краткосрочных, так и более отдаленных – средне - и долгосрочных – целей. В этой проблеме на фоне преобладающей тенденции к обновлению производственной базы важную группу составляют вопросы повышения эффективности существующего парка оборудования, оценки фактического уровня и резервов роста производительности. Именно этому аспекту указанной проблемы на уровне подразделений (цехов, технологических участков) посвящена данная научная работа.

1.2 Производительность оборудования – ключевой фактор эффективности производственной деятельности

1.2.1 Структуризация и оценка производительности технологических ресурсов

Понятие «технологические ресурсы» достаточно широко используется в литературе по организации и управлению производством (см., например, работы [6], [7], [12], [19], [27], [44], [75]. Общепринятое толкование этого понятия к настоящему времени не выработано, поэтому можно встретить различные варианты. В работе [6] понятие трактуется предельно широко и включает «ресурсы различной экономической природы, используемые для обеспечения нормативного (запланированного) режима производственных процессов» [6]. Следуя этому общему определению, к технологическим ресурсам можно отнести не только технологическое оборудование как таковое, но также и любые ингредиенты, используемые в технологическом

процессе, такие как «производственные помещения, транспортные средства, элементы инфраструктуры, некоторые виды информационных ресурсов и т.п.» [6]. В данной работе при использовании понятия «технологические ресурсы» подразумевается весь набор средств, обеспечивающих нормальный ход технологического процесса. Однако в тексте этот факт часто не подчеркивается, и используются термины «машина (станок, установка)» или «(исполнительное) звено», под которым можно понимать и элемент, выполняющий вспомогательные (обеспечивающие) функции. Отметим, что тесно связанные в рамках технологического процесса ресурсы различных видов могут выступать в качестве целостных объектов распределения в задачах оперативного управления производством [75].

Предлагаемый далее подход к структуризации технологических ресурсов изложен в статье автора [62]. Вариант структуризации технологических объектов представлен в графическом виде на рисунке 1 [62].

Технологические машины, как известно, могут выполнять более или менее широкий круг операций, т.е. являются в известной мере универсальными или специализированными. Среди паспортных характеристик машин, как правило, присутствуют данные о пределах номинальной производительности (объемах выработки продуктов в единицу времени при работе в различных режимах). В качестве единицы времени используются относительно малые интервалы, характерные для технологического цикла машина (сек, мин, час), которые не предполагают перерывов по организационным и прочим (плановым и неплановым) причинам.

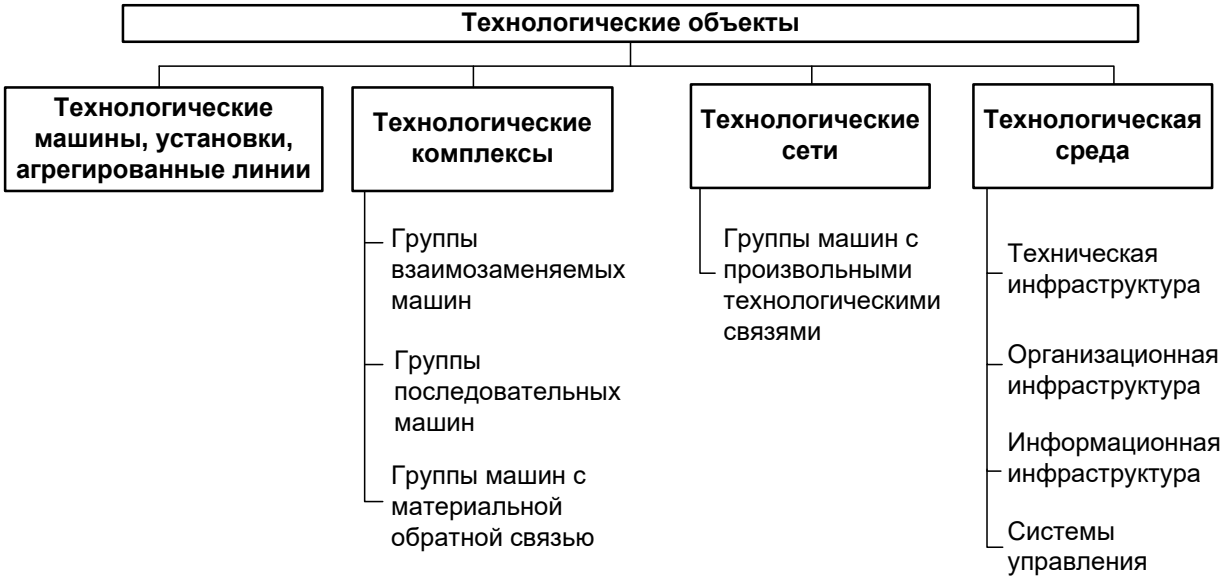


Рисунок 1. Структуризация технологических объектов, ориентированная на расчет производительности

Особенности видов технологических ресурсов далее изложены так, как они представлены в работе автора [62].

Технологический комплекс – это совокупность машин, связанных между собой жесткими или нежесткими связями, обусловленными принятой технологией производства и имеющими организационный характер. Отметим, что машины в составе технологического комплекса могут быть как согласованными, так и несогласованными по производительности. (см. статью автора [62]).

В ситуации, когда на машинах комплекса обрабатываются изделия широкой и относительно часто сменяемой номенклатуры с различиями в составе технологических операций и объемах партий, обеспечить сопряженность технологических переходов по производительности затруднительно (см. статью автора [62]).

Технологические сети – производственные объекты, по своим структурным свойствам близкие к технологическим комплексам. Различие касается количественных характеристик: числа машин, числа обрабатываемых

видов продукции, разнообразия и вариабельности технологических связей. Проблема обеспечения согласованности работы звеньев приобретает особую важность и с ростом размерности сети отличается нарастающей сложностью. А.А. Первозванский использует понятие технологической сети как наиболее общее при описании совокупности технологически связанных машин [58, с. 20-21]. Отметим, что Государственный стандарт [2] предусматривает для характеристики многомашинных систем использование понятий «одномаршрутная структура», «многомаршрутная структура», «сетевая структура». Термин «технологическая сеть» используется в диссертации для обозначения многомашинной системы с сетевой структурой. Понятие сети используется и при описании производственных структур с другими целями, например, при описании связей между объектами в составе виртуальных предприятий (см., [86]). В данном исследовании это понятие используется только для описания структур многомашинных систем в производственных подразделениях.

Технологическая среда предприятия – понятие, содержание которого охватывает описания таких общесистемных функциональных составляющих как техническая, организационная, информационная инфраструктуры, а также система управления [62].

Завершая рассмотрение вопроса о структуризации технологии производства, отметим, что в литературе, в зависимости от целей авторов, используются и иные подходы и термины. Так, в работе [74] при рассмотрении сопряженности частей технологического процесса используется термин «фрагментация». В любом случае выделение фрагментов определяется выполняемыми операциями, с которыми ассоциируются показатели их длительности и/или норм производительности.

В различных отраслях промышленности из-за особенностей технологии и организации производства в плановых расчетах используются методики оценки производительности труда и оборудования, различающиеся по составу

элементов процессов и терминологии, но сходные по смыслу показателей. Различия в методиках расчета имеют место также при рассмотрении последовательного, параллельного или параллельно-последовательного видов движения предметов труда в производстве. Последние из указанных видов более эффективны с точки зрения времени выполнения заданий и, следовательно, роста производительности, но проявляют свои преимущества в условиях крупносерийных и массовых производств. Для распространенных на практике мелкосерийных производств характерным является последовательный вид движения предметов труда. Обработка/изготовление в планово-учетном периоде изделий различных видов требует рассматривать такие производства как многопредметные (многопродуктовые). Именно такие производства являются в диссертации объектом моделирования и системной оптимизации с целью сокращения затрат на функционирование путем коррекции уровней производительности машин и маршрутов движения предметов труда в сети что ведет к повышению уровня сопряженности звеньев.

При оценке производительности важным является выбор интервала времени T, на котором определяется объем обработанной (или изготовленной) на рассматриваемом переходе продукции $V(T)$. При оценке теоретической производительности машины выбирается интервал времени достаточно малый, на котором исключены остановы по организационным и техническим причинам, например, секунда, минута, час. Производительность машины определяется при этом конструктивными особенностями машины, в частности, скоростями ее рабочих органов. В производственных задачах, например, в оперативном планировании, используются данные о фактической производительности, учитывающие потери производительного времени различного вида путем введения в расчет различных понижающих коэффициентов (таких, как коэффициенты полезного времени, работающего оборудования). Учетным интервалом при нормировании может быть,

например, длительность смены ($T = T_{см}$). При моделировании производственных процессов может оказаться удобным перейти от этого (базового) интервала к другому (модельному) интервалу $T_{мод}$ с использованием коэффициента пересчета $k_{мод}$ ($k_{мод} > 0$): $T_{мод} = k_{мод}\, T_{см}$.

Если обозначить через $T_{пер}$ продолжительность плановых перерывов в работе машины в течение базового периода (например, смены), связанных с обслуживанием машины, отдыхом работника, то норму производительности машины за базовый период (смену) $H_{мj}(T_{см})$ при обработке (или изготовлении) продукции j-го вида, $j = 1,2,...m$ (m – число видов продукции) можно определить по формуле:

$$H_{мj}(T_{см}) = (T_{см} - T_{пер}) / (t_{мj} + t_{вj}),$$

где

$t_{мj}$ – основное машинное время на выпуск единицы продукции j-*го* вида, $j = 1,2,...,m$ (детали, комплекта, учетной партии);

$t_{вj}$ – вспомогательное технологическое время при выпуске единицы продукции j-го вида, $j = 1,2,...m$.

Отметим, что норма производительности имеет размерность [*единиц продукции за смену]. Слагаемые в знаменателе отражают затраты времени на единицу продукции и не зависят от интервала учета, но в общем случае зависят от вида продукции. При необходимости перехода при моделировании к использованию иного (модельного) интервала (в частности, такта модели) следует умножить на коэффициент пересчета $k_{мод}$ только числитель формулы:

$$H_{мj}(T_{мод}) = k_{мод}\,(T_{см} - T_{пер}) / (t_{мj} + t_{вj}) = k_{мод}\, H_{мj}(T_{см}).$$

В формулы для расчета нормы производительности могут быть при необходимости добавлены и дополнительные члены, отражающие специфику конкретного производства и не меняющие смысл показателя. В частности, в знаменателе формулы может быть добавлено слагаемое, отражающее усредненные по некоторому периоду наблюдения данные о

непроизводительных потерях времени машины, например, из-за переналадок при переходе к обработке другого вида продукции.

Отметим, что повышение норм производительности машин правомерно рассматривать как фактор, позитивно влияющий на рост эффективности производства. Очевидно, что для действия этого фактора следует уменьшать длительности перерывов в работе по разным причинам, а также уменьшать машинное (штучное) время. В рамках неизменной технологии последнее может быть достигнуто применением более высоких скоростных режимов работы, более совершенного инструмента и оснастки. При этом, очевидно, возрастут издержки производства (за счет повышенного расхода энергии, использования более дорогостоящего инструмента, его ускоренного износа), что может сократить эффект роста производительности. С другой стороны, переход к режиму работы машины с пониженной производительностью (на пониженных скоростях рабочих органов) может оказаться экономически выгодным. Эти вопросы рассматриваются в дальнейшем при постановке и решении задачи оптимальной коррекции уровней производительности машин в технологической сети.

В последующем в диссертации при описании моделей звеньев технологических комплексов и сетей в качестве исходных данных использованы значения норм производительностей, предполагаемые известными. Модельный интервал именуется «тактом модели сети» или, для краткости, «тактом». Подчеркнем, что используемое в теории и практике поточных производств аналогичное понятие «такт потока» относится к задачам организации и планирования производства, которые в данной диссертации не рассматриваются.

Отметим также, что наряду с нормами производительности отдельных машин в необходимых случаях рассматриваются оценки производительности машин и сети в целом, отражающие значения, полученные путем расчетов по предлагаемым моделям. В этих случаях используется термин «оценка

производительности». Определяемые по модели оценки производительности сети следует рассматривать как прогнозные значения, используемые при планировании производства и анализе выполнимости заданных сроков завершения производственных заданий. Также они используются для оценки показателей, характеризующих ход производственного процесса (простоев оборудования, объемов продуктов, находящихся на переходах, средних за период оценок объемов выпуска продукции, абсолютных и относительных величин издержек, связанных с функционированием сети).

1.2.2 Методика оценки эффективности оборудования (ОЭО): критический анализ

Известно, что интенсивность использования различного рода ресурсов, измеряемая количеством полезной работы в единицу времени, является определяющим фактором достижения высокой эффективности деятельности. Более того, оценки интенсивности работы выступают в роли показателей эффективности. В частности, такие показатели используют для оценки эффективности живого и овеществленного труда – это показатели производительности труда и производительности оборудования. Эти два показателя, используются в формах различных измерителей и тесно связаны между собой. В процессе технологического развития повышение производительности техники всегда сопровождалось ростом производительности труда как в локальном измерении на уровне операций и производств, так и в большем масштабе на уровне общественной производительности труда. Вопросы оценки и анализа производительности труда в промышленном производстве были рассмотрены и продолжают привлекать внимание специалистов (см. [45], [52], [54], [69], [85] и др.).

В данной работе рассматриваются вопросы оценки производительности технологических машин и многомашинных систем. Оценка эффективности оборудования, в конечном счете, его производительности, имеет большое значение для обоснования и выбора направлений инвестирования средств в развитие производства [19], [26], [27], [28], [30], [31], [35], [44], [51]. Трактовка понятия производительности отдельных машин или их комплексов в различных методиках одинакова: измеряется выпуск продукции в единицу времени. Многообразие показателей возникает из-за возможности по-разному оценивать, как объем выпуска, так и учитываемое время работы оборудования. Так, в частности, при оценке объема выпуска может учитываться или не учитываться объем бракованной продукции, при оценке времени могут быть учтены различные виды потерь. Рассмотрим для примера одну из представленных в литературе методик оценки эффективности оборудования (см. [36], [95], [96] и др.). Она была разработана в рамках более общей концепции «бережливого производства» [1], [2] и получила наименование “Overall Equipment Effectiveness” (OEE) – Общая Эффективность Оборудования (ОЭО) [36]. В методике реализуется комплексный подход к оценке эффективности, учитывающий как факторы организации работы машины, так и качество произведенной продукции. Некоторые авторы полагают возможным на базе методики OEE формировать оценки эффективности работы предприятия в целом [94], [97]. Такая оценка аналитического потенциала данной методики представляется несколько завышенной. При всей важности производственно-технической базы предприятия на эффективность его деятельности влияют и другие факторы, в частности, качество персонала и менеджмента. Но достоинством методики можно считать детальную проработку многих вопросов организации обслуживания оборудования. Сюда относятся такие методики, как «всеобщее обслуживание оборудования» (“Total Productive Maintenance” (TPM)), управление простоями оборудования (DTM). Все эти частные методики

предполагают детальный учет работы оборудования, прежде всего, учет всех видов потерь рабочего времени. Такой учет представляется крайне важным для достижения конечной цели в системе управления оборудованием, как в режиме текущего функционирования, так и в режиме управления развитием. Наличие такого учета правомерно считать важным признаком высокого уровня производственного менеджмента на предприятии и предпосылкой выработки рациональных решений в управлении технологическим развитием.

Согласно методике ОЭО, показатель эффективности оборудования (OEE) формируется в виде произведения трех оценок:

$$OEE = A \times P \times Q,$$

где

A – показатель «доступности» оборудования (иногда используется термин «готовность»), учитывающий плановые и неплановые потери времени;

P – показатель производительности оборудования;

Q – показатель качества продукции.

Все частные показатели представляются в относительной форме (в виде коэффициентов) при помощи сравнения с некоторыми нормативными или эталонными (возможно, заведомо недостижимыми) величинами. Так, коэффициент A (доступность) определяется как реальное время работы по отношению к общему календарному времени в плановом периоде. Коэффициент производительности исчисляется как реальная оценка по отношению к максимальной оценке выпуска за принятый интервал времени. Качество Q оценивается отношением объема продукции за вычетом бракованной продукции к общему объему выпуска. Таким образом, все частные показатели получают значения из интервала $[0;1]$. Соответственно, и показатель OEE также имеет значение, принадлежащее этому интервалу. Отметим, что «хорошей» оценкой OEE считается значение, превышающее 0,7. Оценка 0,85 рассматривается как трудно достижимая (все частные показатели должны превышать уровень 0,9) [95].

Приведем один из вариантов укрупненной схемы формирования оценки реального времени работы оборудования (см. [95]) (рисунок 2).

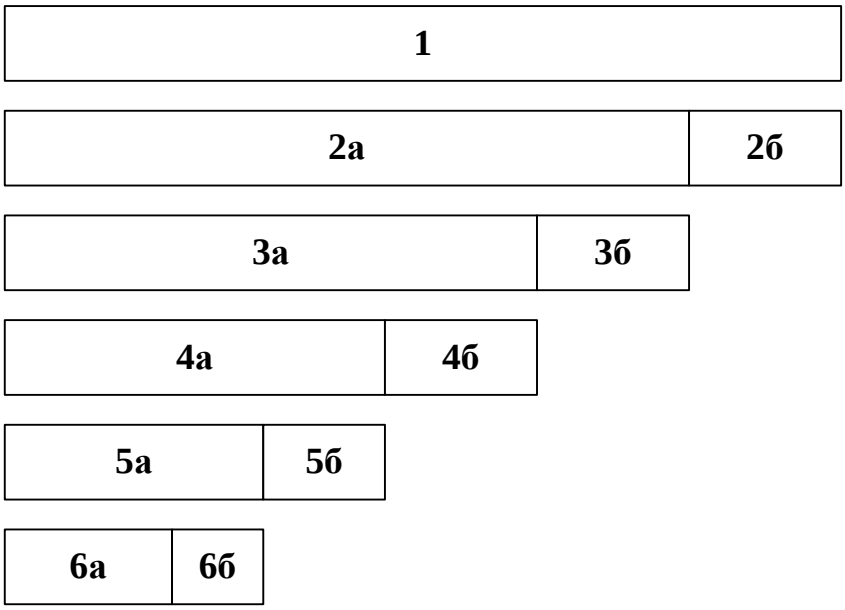


Рисунок 2. Формирование оценки реального времени производства с учетом различных видов потерь рабочего времени
(Источник: [95])

На схеме обозначены:

Календарное время за год 24 × 365 (1),
Календарное время производства (2а) + нерабочее время (2б),
Плановое время производства (3а) + плановые остановки (3б),
Фактическое время работы (4а) + неплановые остановки (4б),
Время работы с номинальной скоростью (5а) + время работы с пониженной скоростью (5б),
Реальное время работы (6а) + потери времени в связи с выпуском брака (6б).
(Все виды учитываемого времени измеряются в часах).

Способ оценки эффективности оборудования с помощью показателя OEE отличается простотой и наглядностью. Однако, по нашему мнению, интегральная оценка в форме произведения частных показателей может быть

использована только как сигнальный индикатор для последующего анализа частных показателей в различных направлениях: организации производства (в частности, оперативного планирования и диспетчирования), собственно управления производительностью машин (скоростью рабочих органов) и обеспечении качества продукции. Можно предположить, что роль сигнального индикатора более информативно мог бы выполнить интегральный показатель в форме минимакса:

$$OEE = min \{A,P,Q\}.$$

Критический анализ показателя OEE и предложения по совершенствованию оценки эффективности оборудования содержатся в работе [36]. Отметим, что в отечественной науке и практике организации производства сложились подходы к оценке эффективности оборудования, в частности, в оценке его производительности, не отличающиеся существенно от методики OEE. Проблемы реализации этих подходов часто заключаются в организации производственного учета факторов, определяющих эффективность оборудования, и построении соответствующих систем управления.

Отметим, что методика на основе OEE, позволяя оценить эффективность отдельной технологической машины или установки, не указывает явно правил оценки эффективности многомашинных систем. Представляется очевидным, что методы усреднения характеристик машин в данном случае не пригодны из-за наличия «системных эффектов». Определенный подход к решению задачи оценки и управления производительностью многомашинных комплексов предлагается в данной работе.

1.2.3 Проблема оценки производительности многомашинных технологических систем. Базовые и сводящиеся к ним структуры. Технологические сети

При оценке производительности группы машин, составляющих технологическую систему, нормы производительности отдельных машин предполагаются известными, и ключевое значение приобретает характер связей (возможных направлений перемещения предметов труда) между машинами. Количество и направленность связей определяют структуру системы, и эта структура оказывает влияние на ее производительность. Во многих случаях это влияние определяется степенью согласованности (сопряженности) машин по производительности. Для некоторых вариантов структур интегральная оценка производительности может быть достаточно легко определена по данным о производительности отдельных машин и структуре связей. Но можно указать такие варианты структур, для которых расчет затруднителен и требует применения специальных методов. Предлагается многомашинные технологические системы разделять на два вида: технологические комплексы и технологические сети. В качестве признака, разделяющего эти понятия, предлагается использовать возможность или невозможность с помощью некоторых аналитических преобразований привести структуру к виду, допускающему расчет производительности по значениям этого показателя для отдельных машин.

Такой признак может быть сформулирован следующим образом. Если структура связей между машинами группы допускает указанную выше возможность, эта группа представляет собой технологический комплекс. Если такой возможности нет, группа рассматривается как технологическая сеть. Далее в данной главе рассматриваются простейшие преобразования структуры связей, характерные для технологических комплексов. Структуры и способы оценки производительности технологических сетей рассматриваются в следующих главах диссертации.

Выделим относительно простые для анализа, *базовые* структуры, из которых могут быть сформированы любые иные варианты структур, характерные для предприятий различных отраслей промышленного

производства. Дальнейшее описание простейших преобразований следует работе [72] с некоторыми добавлениями.

К группе базовых структур технологических комплексов условно может быть отнесено отдельное звено (машина, установка, агрегат), выполняющее закрепленную за ним операцию того или иного вида. Эта, по существу, вырожденная структура является элементом (звеном) любой более сложной структуры, и ее характеристики влияют на свойства комплекса или сети в целом. Разновидностью структуры, состоящей из единственного звена, является звено с материальной обратной связью (звено с реверсом [65]). Вопрос об оценке производительности отдельного технологического звена (машины, станка, установки) рассматривается в главе 2.

Перейдем к рассмотрению других базовых структур технологических комплексов. Отметим, что виды базовых структур, оценки их производительности и правила преобразования были представлены в работе [72], где были предложены способы получения указанных оценок применительно к оборудованию текстильной и легкой промышленности.

Базовой структурой правомерно считать группу из n параллельно работающих взаимозаменяемых машин, выполняющих одну и ту же операцию и имеющих известные нормы производительности $p_1,\ldots,p_n$ (возможно, не совпадающие между собой из-за разнотипности и различного технического состояния оборудования) (см. рисунок 3).

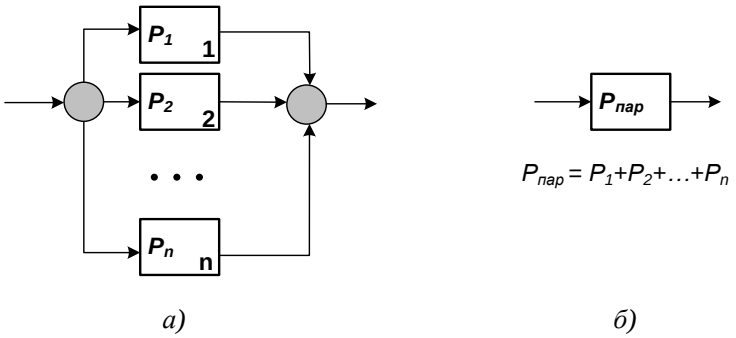


Рисунок 3. Технологический комплекс, состоящий из n параллельно работающих взаимозаменяемых машин: а) структура комплекса, б) звено, эквивалентное комплексу по производительности

В этом случае, очевидно, общая производительность комплекса равна сумме оценок производительности отдельных машин:

$$P_{пар} = \sum_{i=1}^{n} p_i \qquad (1)$$

Следующий вариант базовой структуры сети представляет группа из *n* машин, последовательно выполняющих заданный набор операций. В частном случае в условиях массового или крупносерийного производства при полной сопряженности по производительности всех машин в цепочке такую структуру правомерно называть технологической линией или конвейерной системой (в некоторых руководствах эти названия используются и при нарушении условия сопряженности машин по производительности. В частности, такой подход характерен для теории расписаний [40], [77], [78]). В общем случае в цепочке машин производительности $p_1,\ldots,p_n$ различаются, что ведет к возникновению простоев некоторых машин и образованию сверхнормативных межоперационных запасов на других технологических переходах. Производительность комплекса, представляющего собой группу последовательно соединенных машин, определяется значением минимальной из оценок производительности звеньев («слабое звено») [72]:

$$P_{посл} = \min\{p_1, ..., p_n\} \quad (2)$$

Схема группы из n последовательно работающих машин, и звено, эквивалентное этой группе по производительности, представлены на рисунке 4.

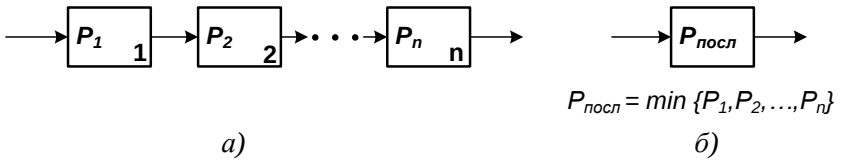


Рисунок 4. Технологический комплекс, состоящий из n последовательно работающих машин: а) структура комплекса,
б) звено, эквивалентное комплексу по производительности

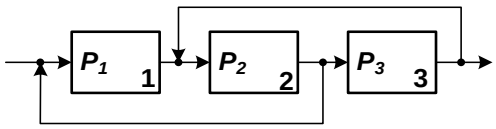
Как отмечено в статье автора [62], каждая из базовых структур в виде параллельных либо последовательных машин с использованием формул (1) и (2) может быть представлена соответствующим единственным звеном, эквивалентным по производительности группе машин (см. статью автора [62]).

Обратим внимание, что указанные преобразования могут быть выполнены только в том случае, если не требуется проводить дифференцированный анализ движения по своим маршрутам через машины комплекса отдельных видов продуктов. Признаком возможности проведения преобразований является отсутствие в совокупности маршрутов операций ветвления по виду продукта. Ветвление осуществляется исключительно по критерию загрузки параллельно работающих взаимозаменяемых машин. Примеры формального преобразования структуры комплекса путем многошаговой процедуры вычленения в ней фрагментов с параллельной, последовательной структурой, а также участков охваченных обратной связью и замены их эквивалентными по производительности звеньями приведены в работе [72]. Подчеркнем, что прямой расчет производительности технологической сети по заданным значениям производительности звеньев с

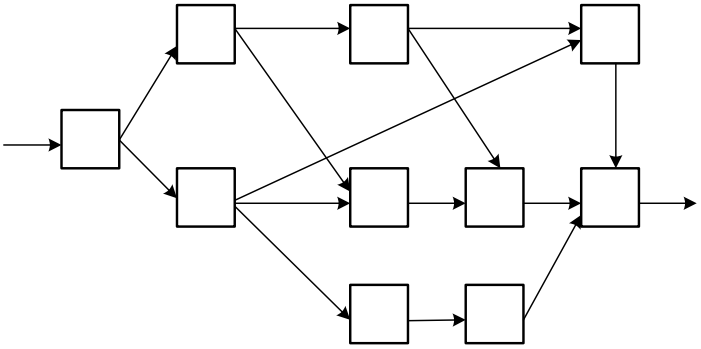
использованием простых преобразований возможен лишь при реализации только одного маршрута перемещения продукта либо (при нескольких маршрутах) только в пределах конкретного маршрута.

На рис. 5, *а* приведен пример структуры, не позволяющей выполнить указанные выше преобразования из-за наличия перекрестных связей. В этом и других случаях, когда нет возможности полностью выполнить упрощающие преобразования с получением единственного звена, эквивалентного по производительности группе машин, такая группа определяется как технологическая сеть. Примеры структур технологической сети приведены также на рисунке 5. Для них оценки производительности следует рассчитывать, используя более общие методы. Некоторые из таких методов предлагаются в следующих разделах данной работы.

Остановимся подробнее на структурах многомашинных комплексов, названных в п.1.3.1 технологическими сетями. В соответствии с принятым определением технологическая сеть представляет собой множество единиц специализированного оборудования, которое используется для выполнения последовательностей операций различного рода над партиями сырья, материалов, полуфабрикатов, других планово-учетных единиц продукции, объединенных условным наименованием «продукты».



а)



б)

Рисунок 5. Примеры структур, для которых из-за наличия перекрестных связей не могут быть выполнены преобразования с целью получения звена, эквивалентного сети по производительности

Партии продуктов перемещаются по своим маршрутам, которые в совокупности образуют систему связей между отдельными машинами. Структура связей, таким образом, определяется логикой технологических процессов для каждого из продуктов и в общем случае может быть произвольной. Признаком сети, отличающим ее от технологического комплекса, было предложено считать отсутствие возможности при оценке интегральной производительности сети провести простейшие преобразования, которые позволили бы заменить звенья с материальной обратной связью и группы параллельных или последовательных машин (звеньев) блоками, эквивалентными соответствующим группам по производительности. Отметим, что определяющим признаком является то, что если даже для отдельных фрагментов сети такие преобразования возможны, свести структуру к единственному блоку с производительностью, равной

этому показателю для сети в целом, не удается (см. [72]). Примеры таких структур технологической сети были представлены на рисунке 5.

Наиболее общей структурной моделью любой сети является граф, вершины которого соответствуют некоторым объектам, а ребра – связям между ними. Ребра могут быть как неориентированными, так и ориентированными. В последнем случае они, как известно, называются дугами, а граф – ориентированным графом (орграфом) [15], [33], [46]. Важную группу среди задач теории графов представляют задачи исследования потоков в сетях. В соответствии с математической традицией задачи исследования потоков в сетях рассматриваются в наиболее общем виде, в частности, в предположении произвольной структуры связей между вершинами модельного графа. Разработанные в теории методы и алгоритмы решения задач опираются, как правило, на строгие формальные результаты и обладают известной универсальностью (в рамках принятых исходных предположений). Однако в некоторых случаях такие свойства методов и алгоритмов, как относительная сложность, громоздкость и чувствительность трудоемкости расчетов к размерности задачи затрудняют восприятие их производственным персоналом и, соответственно, применение на практике. Реальные сети (транспортные, коммуникационные и др.) отличаются от абстрактных моделей общего вида, как правило, меньшим разнообразием связей между звеньями сети и некоторыми другими свойствами. В этих случаях, особенно при умеренных требованиях к близости результатов к оптимальным, правомерно использовать менее трудоемкие (более быстродействующие) приближенные методы и алгоритмы, дающие удовлетворительные для практики результаты и в большей степени специализированные на решении задач определенного класса. В данной работе рассматривается класс задач, относящихся к изучению потоков работ в *технологических* сетях.

Технологические сети обладают некоторыми специфическими свойствами в части формирования и функционирования, отличающими их от

других видов сетей, моделями которых традиционно являются графы. Отметим эти свойства:

- множество технологических и других исполнительских звеньев формируется на начальном этапе создания сети с ориентацией на определенный класс технологий и, соответственно, видов продуктов, что в той или иной мере ограничивает разнообразие связей между вершинами (звеньями) сети. Количество звеньев в технологической системе уровня цеха/участка относительно невелико и, как правило, не превышает нескольких десятков единиц;

- технологические звенья (машины, установки, аппараты и другие устройства) характеризуются набором параметров, либо прямо указывающих значение их номинальной производительности в различных условиях применения, либо позволяющих определить эту оценку в результате расчетов;

- производительность звеньев является управляемой величиной, т.е. может быть изменена в определенном диапазоне возможных значений. Производительность отдельных технологических переходов (рассматриваемых как звенья сети), специализированных на определенных операциях, может быть изменена путем изменения количества исполнителей или единиц оборудования;

- логика перемещения продуктов между звеньями на начальном этапе указывается в общем виде и отражает принцип технологии, реализуемой на данном оборудовании;

- перед началом функционирования формируется множество продуктов, подлежащих производству (оперативный производственный план), и для партий каждого продукта указывается конкретный технологический маршрут (или варианты допустимых маршрутов) его последовательного перемещения между звеньями;

- структура технологической сети предварительно не определена и формируется составом подлежащих выполнению работ путем «наложения» установленных маршрутов движения продуктов;

- совокупность продуктов составляет многопродуктовый (многопредметный) поток, проходящий через сеть и по мере движения разделяющийся на потоки, включающие отдельные продукты или их группы с учетом возможного пересечения маршрутов;

- размерность потоков (количество продуктов в потоке) на входе и выходе сети может различаться. Структура сети может быть сходящейся, расходящейся, комбинированной. Состав и структура потоков на всех переходах считаются заданными;

- передача предмета труда между смежными переходами (машинами) может производиться по разным правилам в соответствии с принятой системой организации производства;

- вследствие возможного несоответствия мощностей существующего оборудования и потребностей в нем оперативной производственной программы требование баланса объемов продуктов на входе и выходе каждого звена часто не выполняется, что приводит к возникновению межоперационных запасов и вынуждает создавать накопители для их хранения. Баланс входа и выхода звеньев обеспечивается учетом на выходе объемов, поступающих в накопитель.

Выводы по главе 1

1. Приведены данные, свидетельствующие об актуальности проблемы повышения эффективности существующего парка оборудования промышленных предприятий. Выделен аспект, касающийся использования многомашинных комплексов, функционирующих в условиях многономенклатурного производства мелкосерийного типа при значительном многообразии технологических маршрутов.

2. Рассмотрены некоторые аспекты оценки производительности как ключевого фактора роста эффективности производственной деятельности. В этой связи проведена структуризация технологических ресурсов и выделен такой объект организации производства как технологическая сеть.

3. Выполнен критический анализ известной методики оценки эффективности оборудования (OEE − “Overall Equipment Effectiveness”). Отмечены положительные качества методики, позволяющие проводить детальный учет потерь времени производительной работы машин, и ее недостатки, ограничивающие возможности оценки эффективности работы групп машин.

4. Приведена сводка методов оценки производительности многомашинных комплексов с различной структурой. Выделены базовые структуры, а также структуры, допускающие преобразование к базовым вариантам. Предложен признак для разделения понятий «технологический комплекс» и «технологическая сеть». Приведена трактовка понятия «технологическая сеть». Выделены особенности технологических сетей, отличающие их от других сетей, традиционно изучаемых в теории графов.

2 МОДЕЛИ ПОТОКОВ РАБОТ И ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

2.1 Потоки работ в производствах дискретного и непрерывно-дискретного типов

В данном параграфе изложение принятых в диссертации понятий потоков и подходов к их описанию следует статье автора [64].

Как известно, в производствах различных видов и типов характеристики технологических ресурсов, в частности, оборудования, существенно различаются. Так, к примеру, в массовом и крупносерийном производстве доминирует оборудование, специализированное на выполнении ограниченного числа операций. В единичных и мелкосерийных производствах экономически часто оправданным является применение универсального оборудования, допускающего перенастройку на выполнение различных операций из определенного множества. Использование технологического оборудования с относительно высокой степенью универсальности является ключевой предпосылкой для создания гибких производств, допускающих возможность адаптации к меняющимся условиям функционирования, в частности, к требованиям перехода к выпуску нового ассортимента при минимальных затратах ресурсов на переналадку организационных и технологических систем [9], [11], [29], [80], [81].

В данной работе рассматриваются производства дискретного или непрерывно-дискретного типов. Примером таких производств может служить красильно-отделочное производство трикотажных предприятий, где суровая ткань перемещается партиями, последовательно подвергаясь обработке на различном специализированном оборудовании (см. [3]). Пример образования и движения потоков полуфабрикатов в красильно-отделочном цехе трикотажного предприятия представлен на рисунке 6 (см. [3], с. 34).

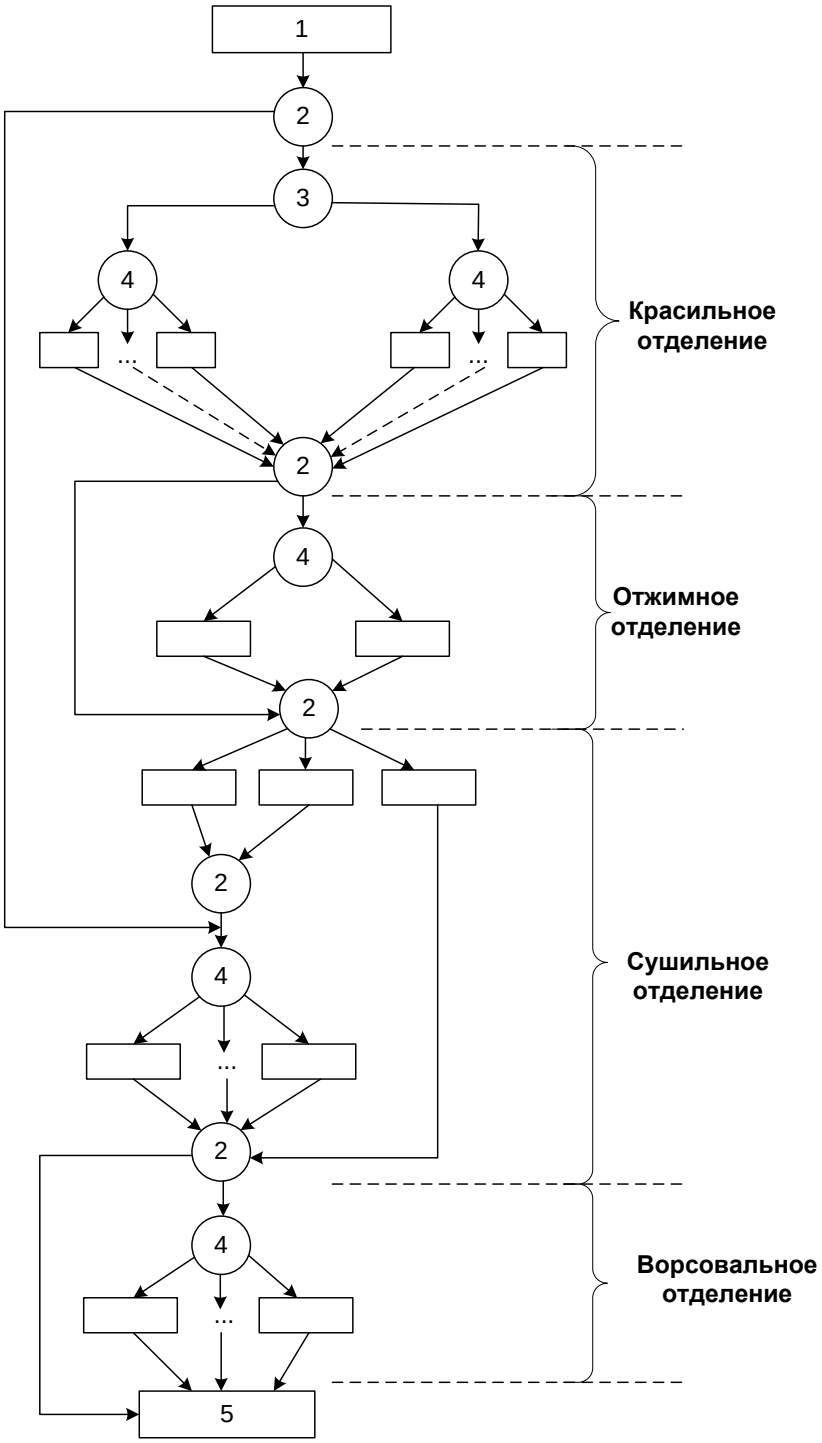


Рисунок 6. Схема формирования маршрутов движения партий полуфабрикатов в красильно-отделочном цехе трикотажного предприятия: 1 – склад суровья; 2 – узлы схемы, где движение партий направляется по артикулу; 3 – узел направления по цвету; 4 – узлы направления по загрузке оборудования; 5 – склад готовой продукции (Источник: [3], с. 34).

В данном исследовании одной из задач является оценка производительности технологических структур различной сложности. В качестве модели потоков работ принимается гипотетический регулярный поток с характеристиками, усредненными на интервале, выбранном при оценке производительности элементов технологического объекта. Изложение принятого подхода следует статье автора [64].

В зависимости от количества продуктов, одновременно перемещающихся по своим маршрутам в производстве, различаются одно- или многопродуктовые потоки (см. статью автора [64]).

В таблице 2 приведены данные о возможных сочетаниях видов потоков и числа возможных маршрутов (таблица приведена также в статье автора [61]).

Таблица 2. Возможные сочетания видов потоков и числа маршрутов

Номер строки	Вид потока на входе сети	Вид потока на выходе сети	Один маршрут	Несколько маршрутов
1	однопродуктовый	однопродуктовый	возможно	невозможно
2	однопродуктовый	многопродуктовый	невозможно	возможно
3	многопродуктовый	однопродуктовый	возможно	возможно
4	многопродуктовый	многопродуктовый	невозможно	возможно

Поясним представленные в таблице 2 ситуации. Если на входе и на выходе сети имеют место однопродуктовые потоки (строка 1), то возможен только один вариант структуры: цепочка звеньев, каждое из которых выполняет свою операцию. При этом операция ветвления осуществляется с учетом загрузки параллельных машин. Пример такой структуры приведен на рисунке 7. Отметим, что все схемы, представленные на следующих рисунках, разработаны автором и вместе с описаниями приведены в статьях автора [61], [64].

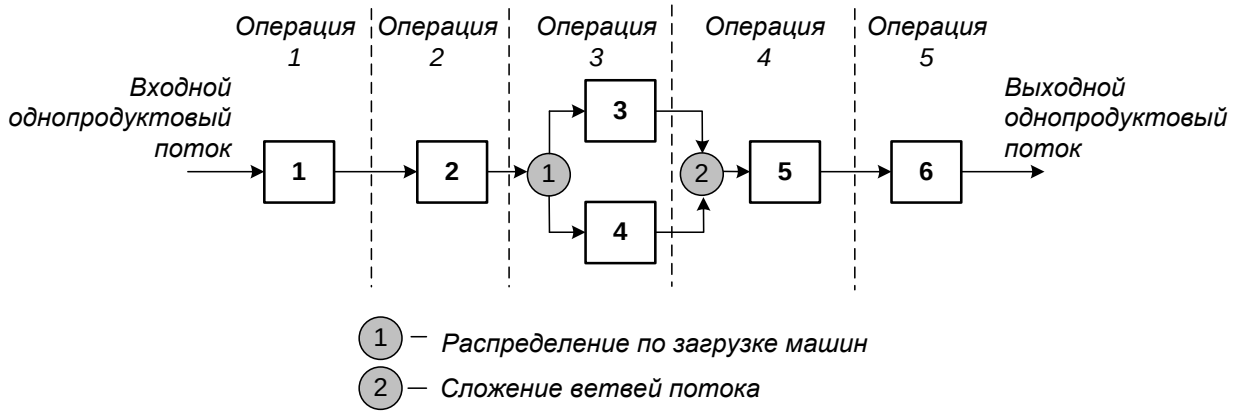


Рисунок 7. Вариант структуры технологического комплекса, обрабатывающего однопродуктовый (одномерный) поток

Если из одного входного продукта вырабатывается несколько конечных (строка 2 таблицы 1), то в технологическом процессе должна присутствовать, по крайней мере, одна операция ветвления по виду продукта, порождающая различные маршруты. В этом случае необходимо указывать доли выходного потока, направляемые по каждому маршруту. Пример возможного варианта структуры такого вида приведен на рисунке 8.

Ситуация, представленная в строке 3 таблицы 2, предполагает, что завершающей операцией в сети является операция сборки конечного продукта (см. [58]). На вход поступают несколько продуктов, и если сборочная операция единственная, то маршрут, по существу, тоже единственный (см. рисунок 9) [64].

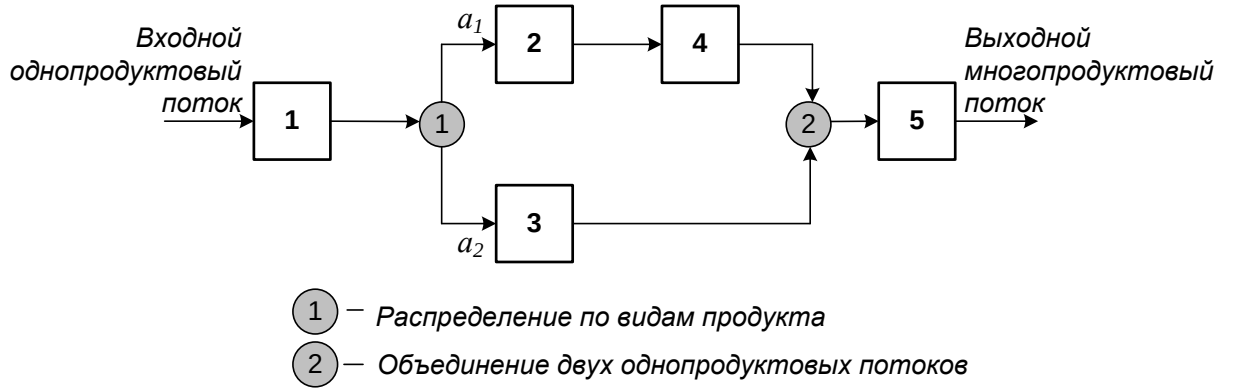


Рисунок 8. Вариант структуры технологического комплекса, преобразующего одномерный поток в многомерный поток на выходе

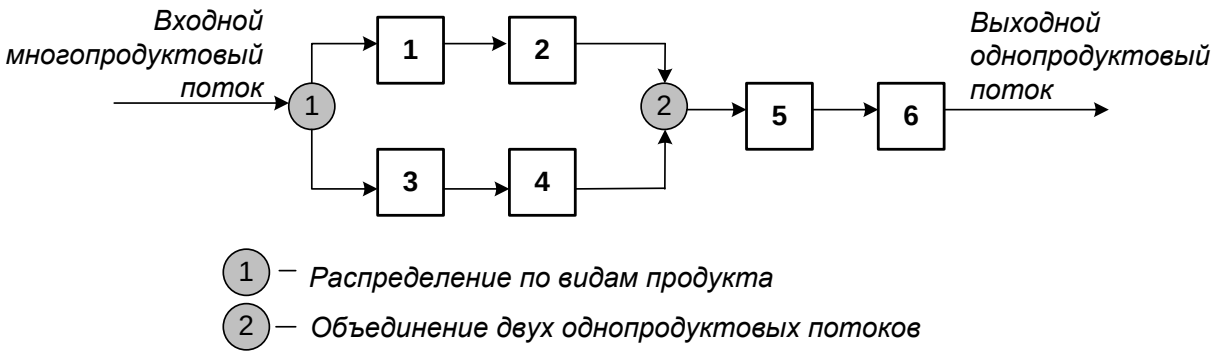


Рисунок 9. Варианты структур технологических комплексов, преобразующих входные многопродуктовые потоки в однопродуктовые потоки на выходе (различные маршруты для предварительной обработки компонент, поступающих на сборку в звене 5)

Ситуация, представленная в строке 4 таблицы 2, является наиболее общей. Для реализации выпуска нескольких продуктов необходимо использовать несколько технологических маршрутов, и требуется наличие, по крайней мере, одной операции ветвления по виду продукта [61]. Отметим еще раз, что для расчета оценок производительности и величины потоков на выходе каждой операции ветвления по виду продуктов следует указывать их объемы, направляемые на входы последующих операций. Следует также указать характерную структуру входного многопродуктового потока. При необходимости оценивать величины потоков и межоперационных запасов следует также указывать требуемое (по спецификации или рецептуре получения соответствующих продуктов) соотношение компонент на входах звеньев, выполняющих операции типа сборки (условия комплектности). Один из возможных вариантов структуры технологического комплекса, на входе и выходе которого потоки являются многопродуктовыми, формирующимися с помощью нескольких маршрутов перемещения продуктов, показан на рисунке 10.

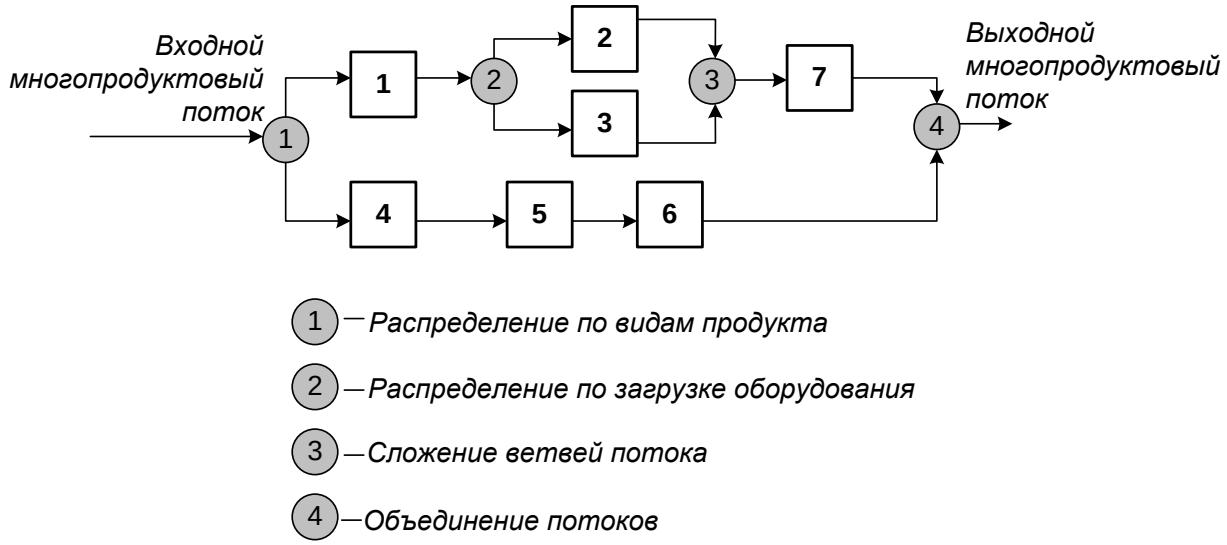


Рисунок 10. Вариант структуры сети, обрабатывающей многопродуктовый поток

В качестве модели одномерного потока рассматривается периодическая последовательность партий одного продукта заданного объема, поступающих на входы технологических машин в дискретные моменты времени. Формально потоки будем обозначать, указывая объемы партий в соответствующие моменты времени: $V(t_q)$, $q = 1,2,\ldots,T$. Подход к моделированию потоков изложен также в статьях автора [61], [64]. Напомним, что в диссертации термин «продукты» принят для обозначения любых промежуточных материальных результатов на выходе звеньев (частично обработанных материалов, заготовок, полуфабрикатов, готовых изделий).

Многомерный поток будем рассматривать как совокупность одномерных потоков. Для такого потока будем использовать обозначение

$\{V_k\ (t_q)\}$, $k = 1,2,..,m$ (m – число одномерных потоков в составе многомерного потока, его размерность). При необходимости указанные обозначения дополняются индексами, отражающими принадлежность партий к входам, выходам звеньев, запасам, а также привязку к технологическим звеньям.

В некоторых случаях в задачах управления производственным процессом интерес представляют суммарные объемы многопродуктовых потоков без их разделения на одномерные потоки (валовый выпуск). В этом случае исследуемые потоки можно назвать условно-одномерными и производить расчеты как с одномерными потоками.

Отметим особенность принятой модели многомерного потока. Предполагается, что интервал $\tau = t_{q+1} - t_q$ для оценки производительности технологических звеньев и объемов перемещающихся партий (этот интервал назван тактом модели сети или, для краткости, просто тактом) принят таким, что состав и структуру потока (соотношение между объемами его компонентов) можно считать неизменными [64]. Например, если производственное подразделение выпускает два вида продукции П1 и П2 и плановые задания на месяц (22 рабочих смены) составляют, соответственно, 100 и 120 единиц, то при оценке производительности технологического объекта за смену принимается, что потоки каждого из продуктов являются периодическими с периодом равным длительности смены (8 час) и с объемами партий: по продукту П1− 100/22 = 4,55 ед., по продукту П2 − 120/22 = 5,45 ед. Таким образом, за один такт суммарный расчетный выпуск продуктов двух видов составит 4,55+5,45 = 10 ед. Такое предположение на практике, чаще всего, не выполняется (возможно, например, что календарный план будет таким: 10 смен подряд выпускается продукт П1в полном объеме (100 ед), затем 12 смен − продукт П2 в полном объеме (120 ед)). Средние оценки производительности при двух подходах к расчету совпадают, однако первый подход, предполагающий каждую смену выпускать продукты обоих видов, ведет к увеличению потерь по организационным причинам, в частности, из-за возможных переналадок оборудования, и скорее всего не будет принят. Подчеркнем, что для решения задач календарного пооперационного планирования требуется более детальное описание потоков работ (см., например, [5], [75], [87]), и изложенный подход не применим. Однако для

целей оценки производительности технологических объектов такой «объемный» подход представляется вполне допустимым. Материал данного параграфа изложен в статьях автора [61],[64].

2.2 Производительность технологической машины при обработке многопродуктового потока

При изложении материала данного параграфа использованы положения, опубликованные в статьях автора [61], [63].

В приведенных выше рассуждениях предполагалось, что производительность машины оценивается для процесса обработки вполне определенного продукта, т.е. для ситуации, когда на вход машины поступает однопродуктовый (одномерный) поток. Но при оценке производительности технологического звена на некотором интервале времени следует учитывать, что на его вход может поступить многомерный поток, включающий в свой состав несколько видов продукции, для каждого из которых установлены различные нормы производительности (см. [61]).

Так, например, производительность станков для лазерной резки металла зависит от вида материала и его толщины. Сходная проблема имеет место для различных раскройных комплексов. В прядильном производстве текстильных предприятий нормы производительности машин зависят от номера (линейной плотности) производимой пряжи. Важно, что зависимость производительности от различных факторов технологически обоснована и известна, что позволяет проводить оценку при плановых расчетах.

Рассмотрим возможные подходы к описанию потоков работ. Отметим, что известные методы и инструменты моделирования бизнес-процессов (см., например, [100]) отличаются универсальностью, но ориентированы на иные

цели, и их применение в рассматриваемых задачах представляется неоправданно затратным.

Примеры операционных моделей, описывающих различные производственные ситуации с учетом временны*ы*х параметров процессов, можно найти в публикациях, посвященных теории расписаний и календарному планированию (см., например, [5], [40], [77], [78]). Приведенные рассуждения изложены также в статье автора [63]. Существуют подходы к моделированию потоков, учитывающие специфику рассматриваемых организационных систем (см., например, [82]).

Представленный далее материал отражен в статьях автора [61], [63], [64].

При решении задач производственного планирования требуется знание характеристик производительности каждой из машин, входящих в сеть (см. [18]). Если обработке подлежит многопродуктовый поток и нормы производительности для входящих в него продуктов различны, то расчет обобщенной оценки производительности может быть произведен следующим способом.

Примем, что суммарное время выполнения заданных объемов плановых работ T_Σ (при включении затрат времени на все виды вспомогательных действий в длительность основных технологических операций) может быть определено по выражению (предполагается, что работы различных видов выполняются на данной машине последовательно):

$$T_\Sigma = \frac{V_1}{p_1} + \frac{V_2}{p_2} + \ldots + \frac{V_m}{p_m} = \frac{\left(V_1 p_2 p_3 \ldots p_m + V_2 p_1 p_3 \ldots p_m + \ldots + V_m p_1 p_2 p_3 \ldots p_{m-1}\right)}{p_1 p_2 p_3 \ldots p_{m-1} p_m} =$$
$$= V_\Sigma \frac{\left(d_1 p_2 p_3 \ldots p_m + d_2 p_1 p_3 \ldots p_m + d_m p_1 p_2 p_3 \ldots p_{m-1}\right)}{p_1 p_2 p_3 \ldots p_{m-1} p_m}$$

где

V_j – объем j-й компоненты потока, поступившего на вход звена, $j = 1,\ldots,m$;

p_j – норма производительности звена при обработке j-й компоненты потока;

d_j – доля j-й компоненты в общем объеме потока.

Введя обозначение

$$p^* = \frac{p_1 p_2 p_3 \dots p_{m-1} p_m}{\left(d_1 p_2 p_3 \dots p_m + d_2 p_1 p_3 \dots p_m + d_m p_1 p_2 p_3 \dots p_{m-1}\right)}$$

или

$$p^* = \frac{\prod_{j=1}^{m} p_j}{\sum_{k=1}^{m} d_k \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m} p_j} \qquad (8)$$

можем записать

$$T_\Sigma = \frac{V_\Sigma}{p^*}.$$

Величина p^* имеет смысл обобщенной оценки производительности звена при обработке продуктов многокомпонентного потока с заданной структурой и с известным общим объемом. При таком подходе описание обработки звеном множества партий различных продуктов с соответствующими значениями производительности заменяется описанием условной операции обработки обобщенной партии с объемом, равным V_Σ, и значением нормы производительности p^*.

Формула (8) используется при расчете производительности машин при обработке многопродуктового потока. Изложенное здесь обоснование формулы приведено также в статье автора [64].

Приведем вид этой формулы для двух- и трехкомпонентного потоков:

- при m = 2:

$$p_i^* = \frac{p_1 p_2}{\left(d_1 p_2 + d_2 p_1\right)} = \frac{p_1 p_2}{\left(d_1 p_2 + \left(1 - d_1\right) p_1\right)} \qquad (9)$$

- при m = 3:

$$p^* = \frac{p_1 p_2 p_3}{\left(d_1 p_2 p_3 + d_2 p_1 p_3 + d_3 p_1 p_2\right)}. \qquad (10)$$

Приведем численный пример использования указанных выше формул.

Пример. Пусть многомерный поток включает два потока ($m = 2$). Параметры потоков: $V = 10$ *ед.*, $v_1 = 3$ *ед.*, $v_2 = 7$ *ед.*; $d_1 = 0{,}3$; $d_2 = 0{,}7$. Нормы производительности звена при обработке каждого из одномерных потоков равны соответственно $p_1 = 6$ *ед./час и* $p_2 = 3$ *ед./час*. Требуется установить значение производительности, которое следует использовать при расчете прохождения многомерного потока через данное звено.

Для расчета искомой производительности звена p_i^* воспользуемся формулой (7). Подставив в нее исходные данные, получим

$p_i^* = (6 \times 3) / (0{,}3 \times 3 + 0{,}7 \times 6) = 3{,}53$ ед./час.

Приведем еще один пример расчета оценки производительности при обработке многопродуктового потока, используя данные реального технологического оборудования.

Пример. На машиностроительном предприятии участок резки металла оснащен портальными машинами термической резки марки S-CUT, предназначенными для автоматической высокопроизводительной резки листового проката металлов (стали, алюминия, меди и их сплавов) при использовании плазменной или газокислородной технологии резки. При использовании газокислородной технологии при резке листов низкоуглеродной стали различных толщин паспортные данные о производительности машины приведены в таблице 3 (данные взяты из технического описания машины S-CUT).

Таблица 3. Скорость резки для различной толщины материала

Толщина материала, мм	Скорость резки, мм/мин	Толщина материала, мм	Скорость резки, мм/мин
6,0	6210	20,0	1920
8,0	4850	25,0	1430
10,0	3735	32,0	805
12,0	3415	38,0	570
15,0	2845	50,0	270

Предположим, что производственное задание на период ΔT включает резку листов стали трех толщин: 10, 20 и 50 мм. Объемы работ определены в результате оценки длин резов по стали каждой толщины и составили: по стали 10 мм – 12000 мм, по стали 20 мм – 16000 мм, по стали 50 мм – 10000 мм. Общий объем работ равен 38000 мм, доли объемов работ каждого вида составляют: по стали 10 мм – 0,316, по стали 20 мм – 0,421, по стали 50 мм – 0,263. Для расчета обобщенной оценки производительности машины воспользуемся формулой (10) для трехкомпонентного потока. Получим:

$$p^* = (3735 \times 1920 \times 270) / (0{,}316 \times 1920 \times 270 + 0{,}421 \times 3735 \times 270 +$$

$$+ 0{,}263 \times 3735 \times 1920) = 782{,}5.$$

Расчетное время технологической операции резки для задания в целом будет равным 38000/782,5 = 48,6 мин. Это же значение будет получено, если суммировать длительности операций резки сталей разных толщин с использованием данных соответствующих нормативных значений производительности. Полученные результаты дают основание в объемных расчетах при моделировании движения многопродуктовых потоков использовать предложенный способ оценки обобщенной производительности машины.

2.3 Преобразование технологическим звеном входного потока продуктов

Материал данного параграфа также отражен в статьях автора [61], [63].

Статическая характеристика многих обрабатывающих звеньев в некоторый момент времени t_0 может быть описана неоднородной функцией вида:

$$V_i^{out}\left(t_0+\tau\right)=\begin{cases} k_{ij}^{вых}V_i^{in}\left(t_0\right) & \text{при} \quad V_i^{in}\left(t_0\right)< p_i\left(t_0\right) \\ p_i\left(t_0\right) & \text{при} \quad V_i^{in}\left(t_0\right)\geq p_i\left(t_0\right) \end{cases} \qquad (12)$$

или в другой форме

$$V_i^{out}\left(t_0+\tau\right)=\min\left\{k_{ij}^{вых}V_i^{in}\left(t_0\right);\, p_i\left(t_0\right)\right\}, \qquad (13)$$

где

$V_i^{out}(t_0 + \tau)$ – объем продукта на выходе i-го звена в момент $t_0 + \tau$;

$V_i^{in}(t_0)$ – объем продукта на входе i-го звена в момент t_0;

τ – запаздывание выхода звена относительно входа, принятое равным такту;

$k_{ij}^{вых}$ – коэффициент, показывающий для i-го звена обусловленное используемой технологией отношение объема выхода к объему входа при обработке j-го продукта (нормативный коэффициент выхода продукта, как правило, $k_{ij}^{вых} \leq 1$; полагаем, что значение коэффициента учтено в оценке производительности);

$p_i(t_0)$ – значение нормы производительности i-го звена в момент времени t_0.

Статическая характеристика, описываемая выражением (13), представлена на рисунке 11.

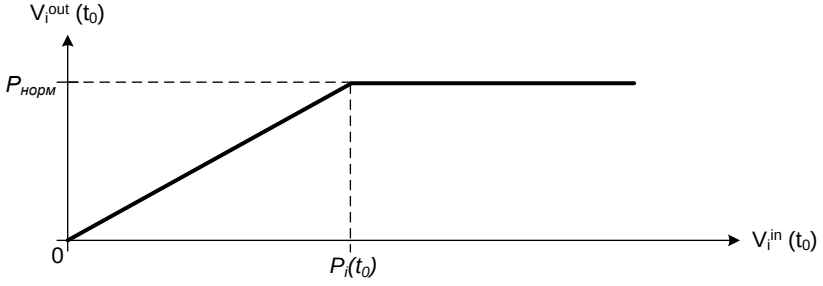


Рисунок 11. Характерный вид зависимости объема продукта на выходе от объема продукта на входе для обрабатывающего звена

Очевидно, что объем выходного потока *i*-го звена и сумма объемов потоков, направляемых на входы других звеньев, должны удовлетворять балансовому соотношению:

$$V_i^{out} = \sum_{j=1}^{n} b_{ij} \times V_i^{out} \tag{14}$$

где

b_{ij} – часть (доля) объема выходного потока *i*-го звена, направляемая на вход *j*-го звена ($1 \geq b_{ij} \geq 0$, $\sum_{j=1}^{n} b_{ij} = 1$).

Объем части входного потока, направляемой в накопитель, устанавливается по выражению

$$V_i^z(t) = \max\left\{\left(V_i^{in}(t) - p_i\right); 0\right\}, \tag{15}$$

где

$V_i^z(t)$ – часть входного потока, остающаяся в запасе в момент *t*, в случае, если объем этого потока превышает значение нормы производительности звена.

Эта часть объема увеличивает запас продукта в накопителе, сформировавшийся к текущему моменту времени *t*. Соответственно, на эту величину увеличивается объем входного потока в следующем временном такте. Таким образом, для *i*-го звена можем записать выражения для объема входного потока:

$$V_i^{in}(t+1) = \sum_{k \in K} V_k^{out}(t+1) + V_i^z(t), \tag{16}$$

где

K – множество номеров звеньев и, возможно, других внешних источников, с выходов которых поступают потоки на вход *i*-го звена.

Из выражений (15) и (16) видно, что при регулярных входных потоках с постоянными объемами, превышающими производительность *i*-го звена, запас в накопителе этого звена будет нарастать с постоянной интенсивностью:

$$V_i^z(t+1) - V_i^z(t) = \sum_{k \in K} V_k^{out}(t+1) - p_i \qquad (17)$$

Схема звена, соответствующая описанной модели, представлена на рисунке 12 [63].

Выводы по главе 2

1. Предложен «объемный» подход к описанию потоков продуктов, согласно которому учитываются характеристики, усредненные по интервалу оценки производительности. Сформулирован подход к оценке производительности технологических объектов, обрабатывающих одно- и многопродуктовые потоки. Рассмотрены структуры технологических комплексов, выполняющих преобразования потоков различной размерности в различных комбинациях. Предложена формула для расчета обобщенной оценки производительности машины при поступлении на вход многопродуктового потока с известной структурой.

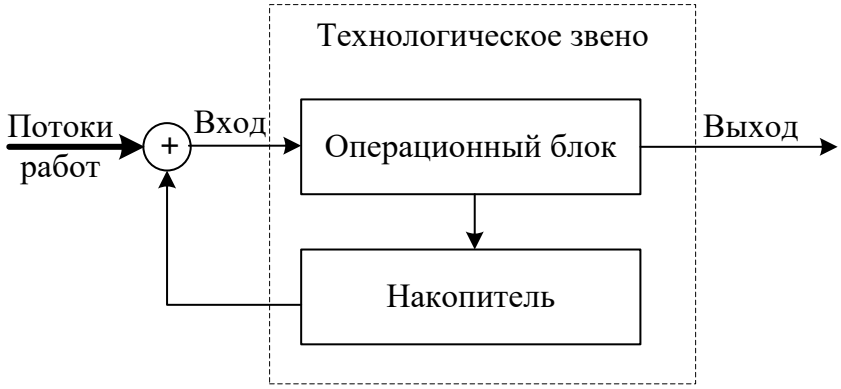


Рисунок 12. Схема звена, состоящего из двух блоков: функционального преобразователя (операционный блок) и накопителя

2. Предложена модель преобразования технологическим звеном входного потока продуктов. Технологическое звено как элемент

технологической сети (наиболее общая форма технологического объекта) предложено представлять в виде двух блоков: функционального (операционного) блока и накопителя.

3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКОВ ПРОДУКТОВ

3.1 Структурная модель технологической сети. Метод оценки максимального потока на основе теоремы Форда-Фалкерсона

Материал данного параграфа изложен также в статье [60], опубликованной в соавторстве с научным руководителем проф. А.В. Архиповым.

В произвольной структуре любого технологического комплекса всегда могут быть указаны (или введены дополнительно) два звена: звено, выступающее в роли источника материального потока (сырья, заготовок и т.п.) и звено, аккумулирующее результат работы комплекса, в котором в пределах рассматриваемой производственной системы завершается материальный поток. Между этими двумя выделенными звеньями может находиться произвольное число «обрабатывающих» звеньев, выполняющих свои операции с известной производительностью и связанных с другими звеньями в соответствии с установленной последовательностью технологических операций. Другими словами, имеется некоторая (технологическая) сеть, имеющая входное и выходное звенья, содержащая некоторое число обрабатывающих звеньев, объединенных между собой направленными связями. Причем каждому звену приписано некоторое число, имеющее смысл производительности звена или, что-то же самое, его «пропускной способности» − показатели, которые измеряются объемом работы, выполняемой в единицу времени. Задача состоит в расчете для данной сети оценки ее общей («интегральной») производительности (пропускной способности). При этом поток работ, проходящий через сеть, может быть однопродуктовым или многопродуктовым [60].

Наиболее распространенной является постановка, рассматривающая движение в сети однопродуктового потока. Число работ, посвященных многопродуктовым потокам, относительно невелико [46], [83], [88]-[91]. Далее рассматривается постановка задачи расчета однопродуктового потока, и предлагаются приближенный метод и алгоритм, построенные с учетом специфики технологических сетей [60].

Для технологической сети с фиксированными значениями производительности (пропускной способности) звеньев при некотором формальном преобразовании исходной постановки задачи подходящей моделью является ориентированный граф $G(X,A)$, в котором X – это множество вершин, соответствующее множеству технологических машин, и A – множество ориентированных ребер (дуг), связывающих некоторые пары вершин. Вершинам графа приписаны «веса» q_i , отражающие их пропускную способность. Моделью для задачи расчета интегральной производительности сети после некоторого преобразования может служить известная в теории графов *задача о максимальном потоке* [46, с. 310-321]. Рассмотрим эту задачу подробнее. Отметим отличие данной модели от исходной постановки задачи: в «классической» модели «веса» приписаны дугам ориентированного графа (орграфа), т.е. каналам, соединяющим вершины, и интерпретируются как пропускные способности этих дуг, в то время как по смыслу задачи для технологической сети такие веса (оценки производительности) следует приписывать его вершинам (они соответствуют технологическим машинам). Для возможности применить разработанные в теории графов методы и алгоритмы решения задачи о максимальном потоке граф с взвешенными вершинами следует преобразовать в эквивалентный ему граф с взвешенными дугами. Процедура такого преобразования изложена, в частности, в [46] и состоит в замене каждой вершины парой новых вершин (версий исходной вершины), соединенных дополнительной дугой с весом, равным оценке производительности исходной вершины. Одна из новых вершин, из которой

исходит дополнительная дуга, определяется как «вход», другая, в которую эта дуга входит, определяется как «выход» исходной вершины. Все дуги графа *G*, входящие в исходную вершину, подаются на ее версию «вход», все дуги, исходящие из нее, исходят из версии «выход». Таким образом, формируется новый граф *G'*, в котором увеличено число вершин и дуг, но конечные веса приписаны только новым дугам, соединяющим версии вершин исходного графа. Предположим, что эта процедура выполнена и поясним подход к решению задачи [60].

В множестве вершин графа *G* выделим две вершины: вершину $x_{0,}$ из которой исходит поток (вход сети, источник (*s*)) и вершину $x_{n,}$ в которой поток, перемещаясь по дугам сети, завершает движение (выход сети, сток (*t*)). Остальные вершины сети будем обозначать $x_{1,}$ $x_{2,}$…,x_{n-1}. Для лучшего соответствия смыслу задачи веса (оценки производительности) в отличие от традиционной постановки задачи о максимальном потоке [46] припишем вершинам графа. Дуги будем обозначать указанием их крайних вершин – начальной и конечной, т.е. запись (x_i , x_j) означает, что дуга направлена из x_i в x_j $(x_i \rightarrow x_j)$. Требуется определить максимальную величину потока через данную сеть.

Для решения этой задачи в теории разработан алгоритм, позволяющий за конечное число шагов установить искомую максимальную величину потока [89], [90]. Алгоритм сводится к циклической процедуре последовательного просмотра вершин графа с приписыванием им «пометок», по которым в итоге устанавливается максимально возможная величина потока через данную сеть [46]. Метод и реализующий его алгоритм весьма трудоемки и не отличаются наглядностью, что затрудняет их использование в производственной практике [60].

В основу метода Форда-Фалкерсона положена доказанная ими теорема, использующая понятие *разреза графа.* Поясним это понятие, следуя [46]. Разделим множество вершин на два подмножества *X* и *X'* так, чтобы вершина-

источник принадлежала подмножеству X, а вершина-сток – множеству X', т.е. $s = x_0 \in X$, $t = x_n \in X'$. *Разрезом* ориентированного графа G при данном разбиении множества вершин на два подмножества называют множество дуг, для каждой из которых начальная вершина принадлежит подмножеству X, а конечная – множеству X'. Каждый вариант разбиения множества X, обладающий указанным выше свойством ($s = x_0 \in X$, $t = x_n \in X'$), порождает свой разрез. Таким образом, генерируя варианты разбиения множества вершин графа на два подмножества, обладающих указанным выше свойством, мы получим множество разрезов. Обозначим это множество через R, а некоторый конкретный разрез через r_k. Число разрезов конечно, хотя может быть весьма значительным.

Величиной (или пропускной способностью или производительностью) $Q(r_k)$ разреза r_k называют сумму пропускных способностей дуг, начальные вершины которых лежат в X, а конечные – в X'.

Минимальный разрез – это разрез с наименьшей величиной среди всех разрезов из R:

$$r_{\min} : Q(r_{\min}) = \sum_{x_i \in X, x_j \in X'} q_{ij} = \min\{Q(r_k)\} \qquad (18)$$

Теорема Форда-Фалкерсона. Величина максимального потока из вершины s в вершину t равна величине минимального разреза, отделяющего s от t [46, с. 312].

Как отмечено автором в статье [60], метод Форда-Фалкерсона дает оптимальное решение задачи, т.е. находит минимальный разрез при любой конфигурации сети. Но в производственной практике чаще встречаются структуры технологических комплексов, имеющие характерные особенности, что позволяет упростить логическую структуру алгоритмов поиска. Так, в частности, для многих типов производств имеет место явная направленность потоков работ от начала к концу технологической сети с относительно редкими возвратами работ для повторной обработки на предшествующих

переходах. Число технологических звеньев (машин, установок), выполняющих различные операции, на уровне цехов и участков относительно невелико. Эти обстоятельства позволяют при поиске решения применить алгоритм полного перебора, основу которого составляют процедуры последовательного генерирования всех возможных разрезов исходного графа, расчета их величин (пропускных способностей) и выбора среди них искомого разреза с минимальной величиной [60].

Возможность применения такого подхода основана на описанном выше преобразовании исходного графа с взвешенными дугами в другой граф с взвешенными вершинами, а также на следующем предположении. Заметим, что только дополнительно введенные дуги между входом и выходом каждой вершины исходного графа, разделенной на две новые вершины, имеют конечные оценки производительностей. Оценки производительностей дуг между вершинами исходного графа условно примем равными бесконечности, что соответствует мгновенной передаче продукта по дуге между выходом одной вершины и входом другой. Отметим, что, если предположение о неограниченной (бесконечной) производительности канала передачи продукта между звеньями сети неприемлемо, то достаточно ввести на дугах дополнительные (транспортные) операции с заданной производительностью.

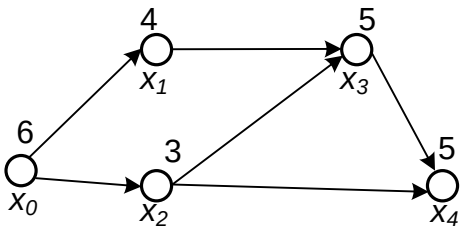
Принятое допущение позволяет упростить метод и алгоритм поиска минимального разреза графа. Пусть для некоторой конкретной задачи о максимальном потоке построен модельный исходный граф, но веса (оценки производительности) приписаны вершинам. Дуги исходного графа, согласно принятому допущению, имеют производительность равную бесконечности. Выполнив описанное выше преобразование модели, получим новый граф, в котором каждая вершина будет заменена парой новых вершин, между которыми появится дуга с заданной конечной производительностью, равной производительности вершины исходного графа. Все остальные дуги, сохранившееся от исходного графа, будут иметь веса (оценки

производительности), равные бесконечности. В этом случае для любого пути в новом графе, включающего хотя бы одну дугу исходного графа, сумму весов следует считать бесконечно большой. Точно также, сумма весов любого подмножества дуг, в которое входит хотя бы одна дуга исходного графа, будет равна бесконечности. Отсюда следует, что, рассматривая разрез графа, содержащий хотя бы одну дугу с весом, равным бесконечности, получим величину такого разреза равную бесконечности. Конечные величины будут иметь только те разрезы, в которых подмножества вершин X и X' связаны между собой только дополнительными дугами, возникшими после преобразования исходного графа, т.е. дугами, связывающими новообразованные версии вершин исходного графа. Отсюда следует, что для поиска минимального разреза достаточно рассмотреть, лишь те разрезы, в которых только версии новых вершин принадлежат разным подмножествам X и X'. Соответственно, в расчет следует принимать только новые дуги и их возможные комбинации. Ряд допущений, принятых при определении технологических сетей, существенно сокращают число таких разрезов. Такое сокращение достигается в тех случаях, когда структуры сети таковы, что не допускают некоторые комбинации дуг. Назовем несколько частных вариантов структур (преобразованных путем введения новых вершин и дуг) сети, ограничивающих число дуг, соединяющих подмножества X и X':

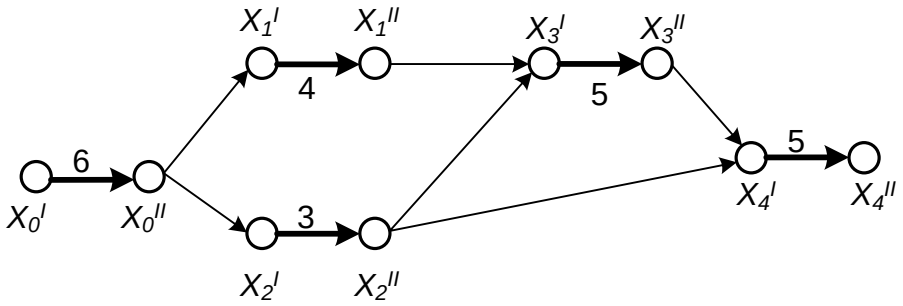
- структура, включающая фрагменты (подграфы), соединенные единственной дугой. Пример такой структуры приведен на рисунке 13 (возле вершин графа указаны оценки их производительности). Отметим, что всегда после преобразования исходного графа появятся как минимум две такие дуги: для вершины-источника потока и вершины-стока;

- структура, допускающая выделение подграфов, включающих несколько параллельных путей между произвольными вершинами. Если каждый из этих путей включает, по крайней мере, одну новую дугу, и нет пути, в которых такие дуги отсутствуют, то следует рассмотреть разрезы, состоящие

из комбинаций таких дуг. Пример, иллюстрирующий данную ситуацию, приведен на рисунке 14 (возле вершин графа указаны оценки их производительности).



а)



б)

Рисунок 13. Первый пример преобразования исходного графа технологической сети с заданными значениями производительности звеньев (машин): а) исходный граф, б) преобразованный граф со значениями производительностей, приписанных дугам («новые» дуги выделены жирными линиями и имеют конечные значения производительности; дугам исходного графа (тонкие линии) приписаны значения производительности, равные бесконечности (на схеме не обозначены)).

Для приведенных на рисунках 13 и 14 примеров перечни возможных разрезов и их величины суть следующие:

- для структуры, представленной на рисунке 13:

Разрез *r1: X = {x0'}, X' = {x0'', x1', x1'', x2', x2'', x3', x3'', x4', x4''},*

связывающие дуги*: R = {(x0'→ x0'')};* величина разреза *Q(r1) = 6 (ед.).*

Разрез *r2: X = {x0', x0'', x1', x2'}, X' = {x1'' x2'', x3', x3'', x4', x4''},*

связывающие дуги*: R = {(x1'→ x1''), (x2' → x2''};*

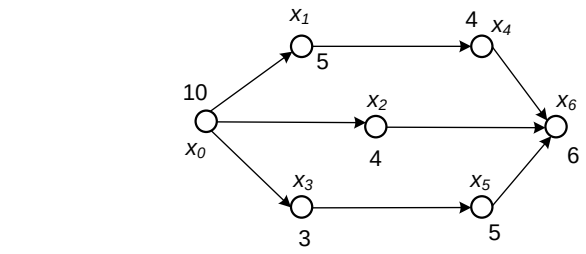
величина разреза *Q(r2) = 4 + 3 = 7 (ед.).*

Разрез *r3: X = {x0', x0'', x1', x1'', x2', x2'', x3', x3'', x4'}, X' = {x4''},*

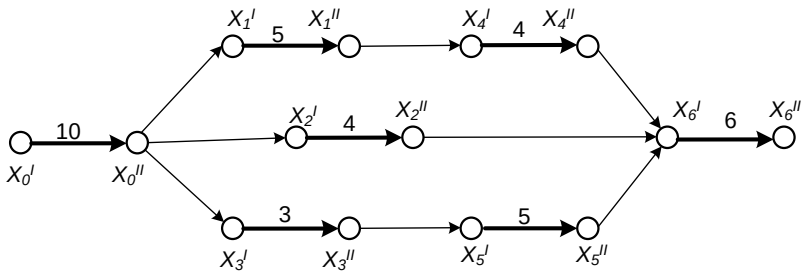
связывающие дуги*: R = {(x4'→ x4'')};*

величина разреза*: Q(r3) = 5 (ед.).*

Остальные разрезы характеризуются тем, что в число связывающих дуг входит, по крайней мере, одна дуга с производительностью, равной бесконечности, что делает их «неконкурентоспособными» при выборе минимального разреза. Таким образом, в данном примере минимальный разрез и, следовательно, согласно теореме Форда-Фалкерсона, максимальный поток через сеть равен *min (r_1, r_2, r_3) = min (6,7,5) = 5 (ед.).*



а)



б)

Рисунок 14. Второй пример преобразования исходного графа. а) исходный граф; б) преобразованный граф.

- для структуры, представленной на рисунке 14:

Разрез *r1: X = {x0'},*

X' = {x0'', x1', x1'', x2', x2'', x3', x3'', x4', x4'', x5', x5'',x6',x6''},

связывающие дуги*: R = {(x0 '→ x0'')};*

величина разреза *Q(r1) = 10 (ед.).*

Разрез *r2: X = {x0', x0'', x1', x2', x3'},*

X' = {x1'' x2'', x3'', x3'', x4', x4 , x5',x5'',x6',x6''},

связывающие дуги*: R = {(x1 ' → x1''), (x2' → x2''), (x3' → x3'')};*

величина разреза *Q(r2) = 5 + 4 + 3 = 12 (ед.).*

Разрез *r3: X = {x0', x0'', x1', x2' , x3',x3'',x5'},*

X' = {x1'' x2'', x3'', x4', x4'' , x5'',x6',x6''},

связывающие дуги*: R = {(x1 ' → x1''), (x2' → x2''), (x5' → x5'')};*

величина разреза *Q(r3) = 5 + 4 + 5 = 14 (ед.).*

Разрез *r4: X = {x0', x0'', x1', x1'' x2',x3',x3'',x4', x5'},*

X' = {x2'', x4 , x5'',x6',x6''},

связывающие дуги*: R = {(x4' → x4''), (x2' → x2''), (x5' → x5'')};*

величина разреза *Q(r4) = 4 + 4 + 5 = 13 (ед.).*

Разрез *r5: X = {x0', x0'', x1', x1'', x2', x2'', x3', x4'},*

X' = {x2'', x3'', x4'' , x5', x5'',x6',x6''},

связывающие дуги*: R = {(x4' → x4''), (x2' → x2''),(x3'→ x3'')};*

величина разреза *Q(r5) = 4 + 4 + 3 = 11 (ед.).*

Разрез *r6: X = { x0', x0'',x1', x1'', x2', x2'', x3', x3'', x4' x4'' , x5',x5'',x6'},*

X' = {x6''},

связывающие дуги*: R = {(x6 '→ x6'')};*

величина разреза*: Q(r6) = 6 (ед.).*

Остальные разрезы характеризуются тем, что в число связывающих дуг входит, по крайней мере, одна дуга с производительностью, равной бесконечности, что делает их «неконкурентоспособными» при выборе

минимального разреза. Таким образом, в данном примере минимальный разрез и, следовательно, максимальный поток через сеть равен

$min\ (r_1,r_2,r_3,r_4,r_5) = min\ (10,12,14,13,11,6) = 6\ (ед.).$

Отметим, что величина максимального потока дает предельную оценку производительности сети в предположении, что при ветвлениях потока распределение объемов по направлениям движения не задано и определяется только оценками производительности звеньев (вершин графа).

Обоснование изложенного выше подхода и полученные результаты опубликованы в статье [60].

3.2 Метод и алгоритм оценки производительности сети с использованием компьютерного моделирования однопродуктового потока работ

В настоящее время при исследовании производственных систем широко применяется метод имитационного моделирования процессов в рассматриваемых объектах (см., в частности, [8], [32], [39], [100] и др.). Этот метод использован также и в данной диссертации.

В соответствии с технологическим назначением сети в ней выполняется некоторая совокупность работ. Другими словами, через сеть перемещается некоторый материальный поток (сырья, полуфабрикатов различной степени обработки), который будем полагать дискретным по времени и который, поступив извне на вход (или на входы) сети, подвергается некоторым преобразованиям в звеньях сети и после этого через один или несколько выходов покидает сеть. Таким образом, если в структурном отношении моделью сети является ориентированный граф, то в функциональном отношении ее моделью может служить некоторый оператор W, преобразующий входной поток $V^{in}(t)$ в выходной поток $V^{out}(t)$, в общем случае,

с некоторым смещением по времени на величину Δt: $V^{out}(t + \Delta t) = W(V^{in}(t))$. Будем полагать, что процессы на входе и выходе каждого звена происходят в дискретном времени, причем величина такта равна интервалу времени, принятому при оценке производительности (например, час, смена). Также примем, что для любого звена потоки на вход поступают в начале такта, а потоки с выхода звена передаются в следующие звенья сети в конце такта. Перемещения по дугам графа от звена к звену происходят без потерь времени (мгновенно) (см. также статью автора [61]). Если путь в графе из вершины i в вершину j проходит через k вершин (звеньев), включая начальную и конечную вершины пути, то партия потока, поступившая в звено i в момент t_i, достигнет выхода последнего звена j этого пути в момент t_{i+k}.

Логично предположить, что в силу конечности значений производительности отдельных звеньев, производительность сети также будет конечной величиной, зависящей, как от производительностей звеньев, так и от структуры связей в сети. Это означает, что при увеличении объемных характеристик входного потока, начиная с нулевого значения, объем выходного потока будет расти вплоть до некоторой предельной (максимальной) величины $V_{max}^{out}(t)$. Причем этот рост в силу «системных (сетевых) эффектов», в общем случае, будет нелинейным, зависящим от структуры связей и соотношения производительностей отдельных машин. При дальнейшем увеличении объема на входе достигнутое значение выхода не изменится. Таким образом, можно сказать, что сеть обладает некоторой ограниченной сверху пропускной способностью (или производительностью). Статическая характеристика оператора W описывается неубывающей по величине объема на входе функцией с насыщением, аналогично тому, как это имело место для отдельного звена (см.п.2.2). Определение величины $V_{max}^{out}(t)$ является одной из задач исследования потоков в сетях различной природы (задача о максимальном потоке [46], см. п.3.1 диссертации).

Пусть число машин в технологической сети равно n, и пусть машины занумерованы по некоторому правилу (см. далее замечание по выбору правил нумерации звеньев). В этом случае совокупность показателей производительности машин, коды (номера) которых упорядочены по определенному правилу и зафиксированы, может рассматриваться как вектор $P = (p_1,\ldots,p_n)$. Множество возможных вариантов структур сети обозначим через C: $C = \{c_1, c_2\ldots..\}$. При описании оператора W вектор P и множество C выступают в роли параметров:

$$V^{out}(t+\Delta t) = W\left(V^{in}(t), P, C\right) \qquad (19)$$

С использованием оператора (19) можно сформулировать различные оптимизационные задачи относительно свойств сети и потоков работ. Для примера приведем постановку следующей задачи:

При заданных $P = P_0$ и $c_0 \in C$ найти максимальное значение выхода V_{max}^{out} (t) и величину входа V_{max}^{in} (t), при которой оно достигается (порог насыщения) (задача о максимальном потоке в сети); формальная запись задачи имеет вид: найти

а) $V_{\max}^{out}(t) = \max\limits_{V^{in}(t)\to\infty}\left\{W\left(V^{in}(t), P, C\right)\right\}$ при $\mathrm{P}=\mathrm{P}_0, C = c_0$

и

б) $V_{\max}^{in}(t) = \arg\max\limits_{V^{in}(t)\to\infty}\left\{W\left(V^{in}(t), P, C\right)\right\}$ при $\mathrm{P}=\mathrm{P}_0, C = c_0$

Максимальная или нормативная производительность каждого звена p_i, как ранее отмечалось, определяется по паспортным характеристикам и предполагается известной. Статическая характеристика звена описывается неубывающей функцией с насыщением, имеющей вид кусочно-линейной зависимости (12) (см. гл.2, п.2.4). В дальнейшем будем рассматривать в качестве элементов сети звенья, выполняющие операции обработки продуктов или ветвления выходных потоков. Будем также полагать, что выполнены все

возможные эквивалентные преобразования структуры сети. В полученной технологической сети операции ветвления выполняются по виду продуктов. Поэтому для каждой такой операции указываются относительные доли выходного потока, направляемые по различным технологическим маршрутам для получения различных конечных продуктов в запланированных количествах.

Напомним, что процессы в сети рассматриваются в дискретной временной шкале $(t = t_0, t_1, t_2, \ldots, t_k, ..)$, в которой расстояние τ между значениями (номерами) соседних моментов времени именуется тактом $(t_{k+1} - t_k = \tau)$ (см. [63]). Объемы продуктов в дискретные моменты времени могут быть постоянными или переменными величинами в зависимости от характеристик моделируемых процессов и целей исследования. Так, к примеру, объемы партий продуктов могут иметь фиксированные значения либо изменяться по детерминированному или случайному закону.

Цель расчета состоит в том, чтобы при заданных характеристиках входных потоков, звеньев и структуре сети, установить вид потоков на выходе каждого звена и сети в целом, а также установить объемы запасов, возникающих в накопителях звеньев. Пользуясь введенной ранее терминологией, можно сказать, что требуется установить алгоритм, реализующий оператор W преобразования входных потоков технологической сети в потоки на ее выходе. На основе этих результатов могут быть рассчитаны оценки производительности сети в виде отношений объема потока на выходе за установленный период времени к длительности этого периода (при известных характеристиках потоков на входе сети).

Рассмотрим одну из возможных алгоритмических схем, позволяющих достичь этой цели. Исходными данными для расчета являются:

- объем потока (одно- или условно-однопродуктового) на входе сети $V^{in}(t)$ (принято, что поток является периодическим и имеет фиксированный объем);

- количество звеньев в сети n и связи между ними (структура, технологические маршруты), вид выполняемых звеньями операций;

- вектор значений производительности звеньев сети $P = (p_1,\ldots,p_n)$;

- величины запасов в накопителях звеньев в начальный момент времени $V_i^z(t_0)$, $i = 1,\ldots,n$; $(t_0 = 0)$.

В качестве результатов расчета примем следующие величины (см. [61]):

- объемы потоков на входах и выходах звеньев сети на заданном дискретном интервале времени $[0;T]$;

- объемы текущих запасов в накопителях звеньев в моменты времени из заданного интервала;

- абсолютные оценки резервов производительности;

- относительные оценки использования производительности звеньев.

Алгоритм построен с использованием двух трехмерных матриц (массивов данных). Одна из этих матриц (обозначена через $S[i,j,t]$) имеет размерность $((n+1)\times n\times T)$), ($i = 0, 1,\ldots,n$; $j = 1, 2,\ldots,n$; $t = t_0, 1,\ldots,T$) и фиксирует в последовательные моменты времени объемы продуктов на входе каждого звена, поступающих извне и с выходов других звеньев, а также из накопителя рассматриваемого звена (см. формулы (14), (15) в п.2.4). Другая матрица ($R[k,i,t]$) введена из соображений удобства фиксации промежуточных и конечных результатов расчетов. В матрице $R[k,i,t]$ строки используются для записи для каждого i и t следующих данных:

строка 1 ($k = 1$) – для записи оценок производительности звеньев;

строка 2 ($k = 2$) – для записи формируемых в процесс расчета объемов продуктов на входах звеньев в момент t;

строка 3 ($k = 3$) – для записи формируемых в процессе расчета объемов продуктов на выходах звеньев в момент t;

строка 4 ($k = 4$) – для записи формируемых в процессе расчета объемов продуктов, поступающих в накопитель рассматриваемого звена в момент t;

строка 5 ($k = 5$) – для записи формируемых в процессе расчета абсолютных значений неиспользованной производительности звеньев в момент t:

$$V_j^{н}(t) = \max\left\{\left(p_i(t) - V_j^{out}(t)\right); 0\right\}, \quad j = 1,...,n \qquad (20)$$

строка 6 ($k = 6$) – для записи формируемых в процессе расчета относительных значений показателя использования производительности звеньев в момент t:

$$V_j^{исп}(t) = \frac{V_j^{out}(t)}{p_j(t)}, \quad j = 1,...,n \qquad (21)$$

Представленные выше формулы с пояснениями приведены также в статье автора [75].

Рассмотрим процедуры формирования матриц S и R на подготовительном и основном (расчетном) этапах алгоритма.

Структура сети описана с помощью матрицы смежности $M(\mu_{ij})$, $\mu_{ij} = 1$, если в модельном графе есть дуга $(i \rightarrow j)$, $\mu_{ij} = 0$, если в модельном графе такой дуги нет. Составлена также и используется в расчетах вспомогательная матрица $B(b_{ij})$, совпадающая с матрицей M в строках, содержащих только одну единицу (это соответствует вершинам, из которых исходит только одна дуга). Если из i-й вершины исходит несколько дуг (в этой вершине выполняется операция ветвления), то каждой из дуг приписывается число, равное доле b_{ij} выходного потока i-го звена, направляемой по соответствующей дуге ($0 < b_{ij} < 1$, сумма элементов строки матрицы B равна единице: $\sum_j b_{ij} = 1$).

На подготовительном этапе последовательно выполняются следующие действия:

- формируются матрицы M и B;

- всем элементам матриц $S[i,j,t]$ и $R[k,i,t]$ присваиваются нулевые значения;

- некоторым элементам нулевой строки при необходимости присваиваются заданные значения объемов продуктов, поступивших к началу

расчетов (при $t = t_0 = 0$) в сеть извне на входы соответствующих звеньев: $S[0,j,0] = V_j^{in}$, $j = 1, 2,..,n$;

- элементам $S[j,j,t]$, $j = 1,...,n$; $t = t_0,...,T$, отражающим текущие объемы продуктов, находящихся в накопителях звеньев, присваиваются заданные начальные значения:

$S[j,j,t] = V_j^z(t)$ (если начальные запасы в накопителях отсутствуют, соответствующие элементы матрицы сохраняют первоначальные нулевые значения);

- в первую строку матрицы R вносятся заданные значения производительности звеньев: $R[1,j,t] = p_j(t)$, $j = 1,...,n$; $t = t_0,...,T$ (допускается, что с течением времени значения производительности звеньев могут изменяться);

- в строку 4 матрицы R вносятся начальные значения запасов в накопителях звеньев, если эти значения заданы: $R[4,j,t] = V_j^z(t)$, $j = 1,...,n$; $t = t_0,...,T$ (допускается, что эти значения могут быть заданы для любого значения t из рассматриваемого интервала).

Перейдем к изложению основного этапа алгоритма. Содержание этапа сводится к последовательному просмотру звеньев в соответствии с принятой их индексацией, зафиксированной в исходных и формируемых матрицах (матрицы M, B, S, R). Для последовательных моментов времени и на очередном шаге процедуры для каждого звена, начиная с первого, с использованием исходных данных и результатов предыдущих шагов рассчитываются значения объемов продуктов на входе, на выходе, и направляемых в свой накопитель в виде запаса. На каждом шаге корректируются значения элементов матриц S и R, что в итоге позволяет сформировать представления о динамике потоков на выходе сети и других предусмотренных условиями задачи показателей. После просмотра всех звеньев для каждого момента времени из заданного интервала результаты оказываются зафиксированными в массиве R. Алгоритм заканчивает работу.

Изложенный алгоритм реализован автором в виде компьютерной программы на языке JAVA (имеется свидетельство о государственной регистрации, см. Приложение 3). Пример применения алгоритма в условиях цеха механообработки представлен в главе 4 (см. п. 4.4).

3.3 Метод и алгоритм оценки производительности сети с использованием компьютерного моделирования многопродуктового потока работ

В данном разделе рассматривается технологическая сеть, состоящая из n звеньев (технологических машин, установок, других исполнителей технологических операций). Через звенья сети последовательно проходят партии различных продуктов (сырья, материалов, полуфабрикатов различной степени обработки) заданного объема. Поступление продуктов на вход сети повторяется по определенным правилам (например, периодически). Таким образом, на вход сети поступают потоки «работ», подлежащих выполнению звеньями сети. Потоки одного продукта («однопродуктовые») будем, как было условлено ранее, также называть одномерными. При одновременном движении по некоторым маршрутам или их частям из нескольких одномерных потоков образуется многопродуктовый или многомерный поток. Число m потоков отдельных продуктов, входящих в многопродуктовый поток, будем называть размерностью потока. Структурой многомерного потока будем называть упорядоченное множество относительных долей объемов одномерных потоков в общем объеме многомерного потока. Подчеркнем, что в процессе прохождения через сеть состав и структура многомерного потока могут меняться в силу того, что составляющие его потоки должны перемещаться по различным маршрутам. Это приводит к тому, что структуры

потоков на входах отдельных звеньев не совпадают со структурой входного потока сети. Это обстоятельство было отмечено в п.2.2.

Операции, выполняемые в звеньях, связаны с обработкой продуктов и их распределением по направлениям дальнейшего движения в сети, т.е. предполагается, что необратимые или условно-необратимые операции типа сборки или смешивания в звене входных потоков исключены. При наличии таких операций при движении потоков в сети возникают новые потоки – потоки сборочных единиц, которых не было в составе входного многомерного потока. Эта особенность может быть учтена при моделировании, но несколько усложняет алгоритм, имитирующий процесс движения продуктов в сети. Потоки отдельных продуктов перемещаются по своим технологическим маршрутам (последовательности номеров звеньев). Таким образом, структура сети формируется в результате «наложения» маршрутов движения потоков продуктов на упорядоченное множество звеньев. В рассматриваемой постановке задачи предполагается, что маршруты не содержат повторного выполнения ранее пройденных операций. Это предположение позволяет использовать «естественную» нумерацию звеньев: номера присвоены так, что все перемещения осуществляются от звеньев с меньшими номерами к звеньям с большими номерами [58]. Каждому звену сети приписан набор чисел, интерпретируемых как оценки производительности звена (объем выполненной работы в единицу времени) при обработке продуктов каждого из одномерных потоков, входящих в многомерный поток. В указанных условиях аналогично тому, как было сделано в предыдущих параграфах данной главы, структурной моделью технологической сети, может служить взвешенный ориентированный граф $G(X,A)$, где $X = \{x_i\}$ – множество вершин, соответствующих машинам $i = 0, 1,2,\ldots,n$, A – множество дуг $(i \rightarrow j)$, указывающих возможные перемещения хотя бы одного из продуктов с выхода звена i на вход звена j, ($i, j = 1,2,\ldots,n; j \geq i$). Матрицу производительностей звеньев обозначим через $P = (p_{kj})$, $k = 1,2,..m; j = 1,2,\ldots,n$ (p_{kj} – нормативная

производительность *j*-й машины (звена) при обработке продукта *k*-го потока, являющегося компонентом многомерного потока).

Целью моделирования прохождения многопродуктового потока через технологическую сеть является получение оценки производительности сети при заданных значениях производительности звеньев и характеристиках потоков (число, объемы, структуры).

Предварительно укажем принятые и частично ранее прокомментированные предположения относительно структуры и свойств многомерного потока, поступающего на вход сети. Будем полагать, что

- движение потоков происходит в дискретной шкале времени на интервале *[0,…,T]*; разность между соседними моментами времени будем называть тактом: $t_{k+1} - t_k = \tau$;

- партии продуктов поступают на входы звеньев в начале каждого такта, что означает периодический характер одномерных потоков; в течение такта осуществляется обработка части поступивших продуктов;

- объемы партий продуктов конкретного вида фиксированы и не меняются на интервале моделирования;

- многомерный поток на входе сети образуется наложением *m* одномерных потоков и поэтому также является периодическим с периодом, равным такту (*примечание:* данное предположение означает, что в многомерном потоке все отдельные потоки каждого из продуктов «хорошо перемешаны» между собой так, что в текущем такте для каждого звена структура многомерного потока на его входах и выходах сохраняется (при этом после операции ветвления структуры отдельных потоков могут измениться)); отметим, что выдвинутое предположение приближается к реальности с увеличением длительности такта; такое представление потока существенно отличает модель от описаний, принятых в календарном планировании.

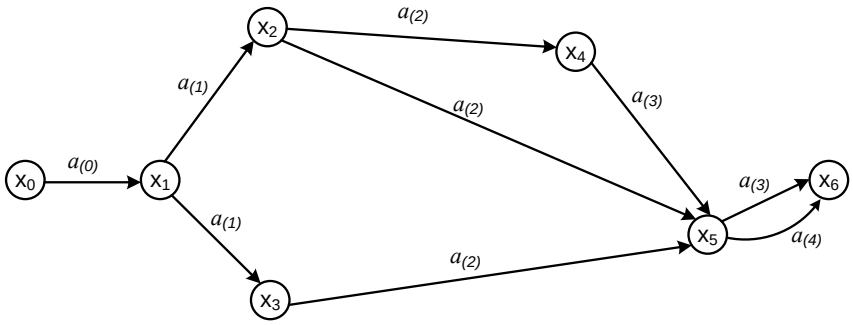
Как и в случае одномерного потока, рассмотренного ранее в п.3.2, отдельное звено сети включает в себя обрабатывающий блок и накопитель. Обрабатывающий блок, в отличие от одномерного случая, характеризуется не скалярной оценкой производительности, а набором (вектором) таких оценок, каждая из которых относится к определенному виду продукта (потоку). В качестве обобщенной оценки производительности звена $p_i^*(t)$ используется оценка, рассчитанная по формуле (8) (см. гл.2, п.2.3) для текущего такта с учетом долей $d_{ki}(t)$ каждого из потоков в общем объеме входного многопродуктового потока i-го звена.

Напомним, что если объем потока на входе звена в момент t превышает его производительность $p_i^*(t)$, то излишек направляется в накопитель и в следующем такте будет суммирован с объемом входного потока (см. п.2.4, а также статью автора [61]). Отметим важное допущение, оправданное, как представляется, при объемных расчетах: структура части потока, идущей на обработку (в объеме, равном производительности $p_i(t)$), и структура части, направляемой в накопитель, полагаются одинаковыми. В операционных моделях движения потоков такое предположение было бы неприемлемым. Также полагаем, что объемы накопителей неограниченны.

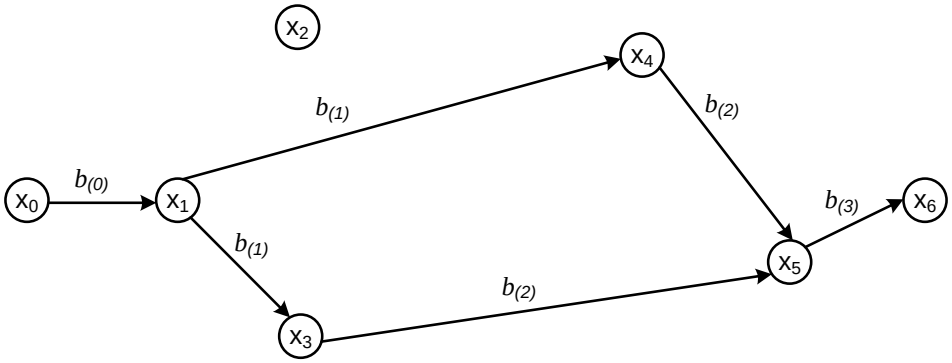
Технологическая сеть состоит из звеньев, имеющих описанную выше структуру. Структура связей между звеньями образуется указанием маршрутов для каждого из потоков. Для обеспечения возможности отражать в модели различные производственные ситуации принято, что в начальный момент времени для каждого звена могут быть заданы объемы продуктов на входе обрабатывающего блока и в накопителе. Для определения суммарных объемов на входе и выходе сети выделены две вершины: вершина-источник (x_0) многопродуктового потока, выполняющая функцию аккумулирования («совмещения») всех однопродуктовых потоков на входе и распределения этого потока по направлениям дальнейшего движения в сети, и вершина-сток (x_n), в которой суммируются объемы всех потоков, поступающих на выход

сети. Эти две вершины являются соответственно первым и последним звеном любого маршрута движения потоков. Как и другие (промежуточные) звенья сети, они обладают заданной конечной производительностью.

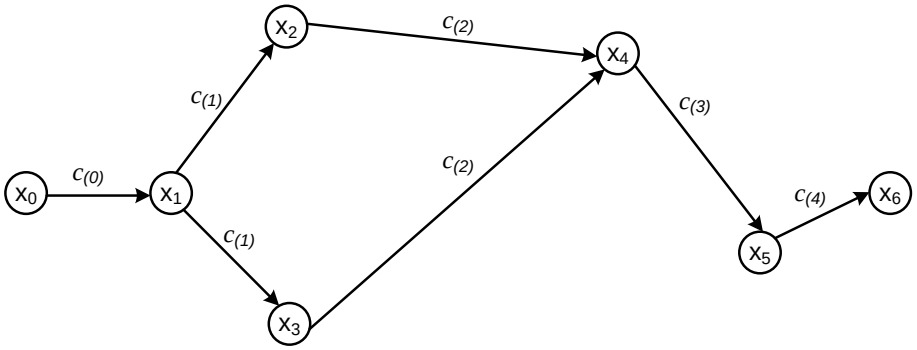
Каждый из потоков, входящих в многомерный поток, продвигается по сети в соответствии со своим маршрутом с учетом запланированных заранее распределений объемов продуктов по направлениям движения. Пути перемещения каждого *k*-го потока описываются соответствующим графом $G_k(X,A_k)$ (множество X вершин графа одинаково для всех потоков, множество дуг A_k соответствует своему потоку). В принятой модели потоки перемещаются по сети «одновременно», поэтому структура модельного графа для многомерного потока образуется совмещением графов $G_k(X,A_k)$ в один отражающий все возможные перемещения для всех потоков мультиграф $G(X,A)$, для которого некоторые пары вершин связаны несколькими дугами. Пример приведен на рисунках 15 и 16. Многопродуктовый поток формируется из трех отдельных потоков, обозначенных *a, b, c*; (в скобках возле обозначения потока указан номер такта, в который этот поток появляется на выходе звена). Маршруты потоков показаны на рисунке 15, *а, б, в.* Структура мультиграфа, образованная в результате совмещения маршрутов отдельных потоков, показана на рисунке 16. Пример моделирования многомерного потока представлен в Приложении 2.



а)



б)



в)

Рисунок 15. Маршруты потоков a (а), b (б), c (в), входящих в многопродуктовый поток
(цифры в скобках указывают номер такта, в который соответствующие потоки поступают на входы звеньев)

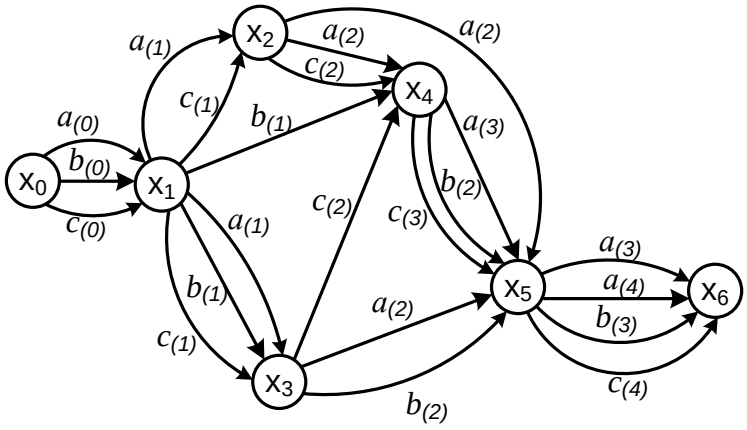


Рисунок 16. Мультиграф, отражающий направления движения в сети компонент a, b, c многопродуктового потока

3.4. Объемное планирование загрузки технологических сетей с использованием цифровой модели потоков работ

Подходы к исследованию различных аспектов работы многомашинных систем как разновидности технологических сетей в контексте производственного планирования рассматривались в работах [4], [5], [6], [14], [16], [17], [52], [74], [75]. В данном разделе в развитие указанных работ рассматривается задача обоснования объемного плана производства с учетом требований минимума потерь, связанных с такими факторами, как неполное использование производственных возможностей оборудования и сверхнормативные запасы полуфабрикатов на технологических переходах. Объектами исследования являются производства серийного типа с дискретным характером движения предметов труда. Примером таких производств могут служить красильно-отделочные предприятия и отдельные цеха и производства в текстильной и легкой промышленности [3]. Задачей данного исследования является разработка метода определения оптимальных по принятым критериям характеристик потоков работ (партий полуфабрикатов), поступающих на вход многомашинного комплекса.

Методическую основу исследования составляют методы математического и компьютерного моделирования процесса обработки дискретного потока работ группой машин, каждая из которых специализирована на выполнении определенной операции. Принято, что работы образуют поток партий материала одного вида, периодически поступающих на вход комплекса на конечном интервале времени. Объем и период поступления партий фиксированы. Из полуфабриката, поступающего на вход комплекса, должны быть получены несколько видов конечной продукции. С этой целью объемы на выходах отдельных машин (звеньев сети)

распределяются в заданной планом пропорции по нескольким направлениям. Таким образом, формируется множество маршрутов движения партий между машинами комплекса (см.гл.2 и статью автора [61]). Структурной моделью многомашинного комплекса, как было отмечено ранее и также отражено в статье [60], может служить сеть, отображаемая ориентированным графом $G(X,A)$, где $X = \{x_0, x_1, \ldots, x_{n-1}\}$ – множество вершин, которым соответствуют машины (звенья сети), A – множество направленных дуг, соединяющих некоторые пары вершин [15], [46]. Граф G является взвешенным: вершинам приписаны «веса», численно равные нормативным значениям производительности соответствующих машин. Пути в графе соответствуют маршрутам, по которым перемещаются партии полуфабрикатов, превращаясь в итоге в партии продуктов различных видов. В модели приняты следующие предположения. Поток работ является дискретным и периодическим. Партии имеют одинаковый объем. Интервал времени между поступлениями партий на вход комплекса назван тактом и принят равным интервалу, используемому при оценке производительности машин. Потоки на входе сети и на входе j-го звена (машины) обозначаются, соответственно, $V^{in}(t)$ и $V_j^{in}(t)$, $t = 0,1,2,\ldots,T$ (номера тактов); $j = 0,1,\ldots,n-1$. Подчеркнем, что объемы партий и значения производительности приводятся в расчете на один такт, так что единицей измерения как объема на входе/выходе звена, так и его производительности является [*ед.прод. / такт*]. Поток, имеющий вид серии партий, последовательно поступающих в такты $0,1,\ldots,T-1$, обозначен $\{V^{in}(t)\times \mathrm{T}\}$. Общий объем продукта в серии будем обозначать через V_Σ ($V_\Sigma = V^{in}(t)\cdot T$) [61].

Как было отмечено в гл.2 (см. п.2.4), отдельная машина представлена в модели совокупностью двух блоков – функционального, отражающего преобразование продукта, и блока-накопителя, в котором аккумулируются запасы продукта, возникающие при превышении объема на входе звена над уровнем его производительности.

В дальнейшем использованы следующие обозначения:

n – число машин в комплексе (технологической сети),

$M = (\mu_{ij})$ – $n \times n$-матрица смежности модельного орграфа;

$B = (b_{ij})$ – $n \times n$-матрица распределения потоков на выходе каждой машины комплекса, $b_{ij} \in [0; 1]$, сумма элементов каждой строки равна единице;

p_j – производительность j-й машины (звена комплекса), $j = 1,...,n$ (*ед.прод/такт*);

$V^{in}(t)$, $V^{out}(t)$ – объемы продукта на входе и на выходе технологической сети (*ед.прод/такт*);

$V_j^{in}(t)$, $V_j^{out}(t)$ – объемы продукта на входе и на выходе j-й машины (звена сети) в момент времени t, $j = 1,...,n$; $t = 1,...,T$ (*ед.прод/такт*);

$V_j^z(t)$ – запас продукта, поступающий в накопитель j-й машины в момент времени t, $j = 1,...,n$; $t = 1,...,T$ (*ед.прод/такт*) ;

$r_j(t)$ – резерв производительности j-й машины в момент времени t, $j = 1,...,n$; $t = 1,...,T$, (*ед. прод /такт*).

Зависимости объема на выходе звена, объема запаса в накопителе и величины неиспользуемого резерва производительности от объема на входе описываются формулами, введенными в гл.2 (см. п.2.4):

$$V_j^{out}(t) = \min\left\{V_j^{in}(t); p_j\right\}, \; j = 1, 2, ..., n \tag{22}$$

$$V_j^{z}(t) = \max\left\{\left(V_j^{in}(t) - p_j\right); 0\right\} \tag{23}$$

$$r_j(t) = \left|\min\left\{\left(V_j^{in}(t) - p_j\right); 0\right\}\right| \tag{24}$$

Если последовательно увеличивать объем продукта на входе сети в диапазоне $[0; V_{max}(0)]$, суммарные потери, связанные с простоями машин и сверхнормативными запасами в накопителях, вначале будут уменьшаться за счет роста загрузки (сокращения резерва) звеньев, затем после достижения предельной загрузки будут увеличиваться за счет роста запасов. Очевидно, существует некоторый, оптимальный объем продукта на входе $V_{opt}(t)$, при

котором суммарные потери минимальны. Определение указанного объема является целью решения задачи.

В дальнейшем будем использовать также следующие обозначения:

$S(V^z(t)) = S_z$ – штрафная функция, отражающая потери, связанные с превышением суммарными запасами в накопителях машин установленного для этого показателя норматива в течение планового периода времени (в частности, норматив запаса может быть равным нулю);

$S(r(t)) = S_r$ – штрафная функция, отражающая потери, связанные с суммарной величиной неиспользованных резервов производительности машин в течение планового периода времени;

S – штрафная функция, отражающая общие (суммарные) потери, связанные с неполным использованием производительности машин и сверхнормативными запасами продукта в накопителях;

α_r , α_z – нормирующие коэффициенты, преобразующие соответствующие оценки в стоимостную форму (оценки удельных затрат в течение одного такта из-за неполного использования производительности машин (α_r) и образования сверхнормативных запасов (α_z)).

Для оценки качества использования производственного потенциала сети на заданном интервале времени использованы следующие локальные критерии:

- суммарные потери из-за неполного использования производительности звеньев, определяемые по формуле (25)

$$S_r = \alpha_r \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} r_j(t) \qquad (25)$$

- суммарные потери из-за возникающих на отдельных машинах (операциях) запасов продуктов, определяемые по формуле (26)

$$S_z = \alpha_z \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} V_j^z(t) \qquad (26)$$

При переходе с помощью коэффициентов α_r и α_z к стоимостной форме показателей в качестве интегральной оценки качества плана может быть использован критерий в виде линейной свертки указанных локальных критериев. Этот критерий представлен следующим выражением (27):

$$S = \left(\alpha_r \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} r_j(t) + \alpha_z \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} V_j^z(t) \right) =$$

$$= \left(\alpha_r \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} \left| \min\left\{ \left(V_j^{in}(t) - p_j \right); 0 \right\} \right| + \alpha_z \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{n} \max\left\{ \left(V_j^{in}(t) - p_j \right); 0 \right\} \right) \to \min \quad (27)$$

При фиксированных значениях производительности звеньев p_j и маршрутах движения потоков и принятых предположениях величины объемов на входах каждого звена $V_j^{in}(t)$ $(j = 1,\ldots,n;\ t = 0,1,\ldots,T)$, входящие в выражение (27), однозначно определяются объемом потока на входе комплекса $V^{in}(t)$. Численные значения объемов на входах машин $V_j^{in}(t)$ устанавливаются в результате моделирования движения потоков в технологической сети (соответствующие алгоритмы описаны в гл.3, п.3.2, п.3.3). В вычислительном эксперименте объем на входе сети дискретно изменялся с проведением каждый раз расчетов с использованием моделирующего алгоритма. В результате была установлена зависимость оценки потерь от объема на входе сети, по которой определена область значений входа, обеспечивающих минимальные или достаточно близкие к ним величины суммарных потерь. Поясним изложенный подход численным примером.

Рассмотрим комплекс, состоящий из четырех машин ($n = 4$). Маршруты движения партий продукта по машинам комплекса заданы. Примем, что модельный граф комплекса $G(X, A)$, где $X = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}$, A – множество дуг, состав которого определен установленными маршрутами, имеет вид, представленный на рисунке 17. Звено x_0 является входным звеном сети и имеет при каждом прогоне модели производительность, равную объему партии продукта на входе. Остальные звенья имеют следующие фиксированные значения производительности (*ед.прод./такт*): $p_1 = 5;\ p_2 = 4;\ p_3 = 3$. В данном

иллюстративном примере нормирующие коэффициенты приняты равными единице: $\alpha_r = 1$ (*руб/(ед. прод./такт)*), $\alpha_z = 1$ (*руб/(ед. прод./такт)*). Относительная важность сокращения каждого из принятых критериев для планирующего органа принята одинаковой.

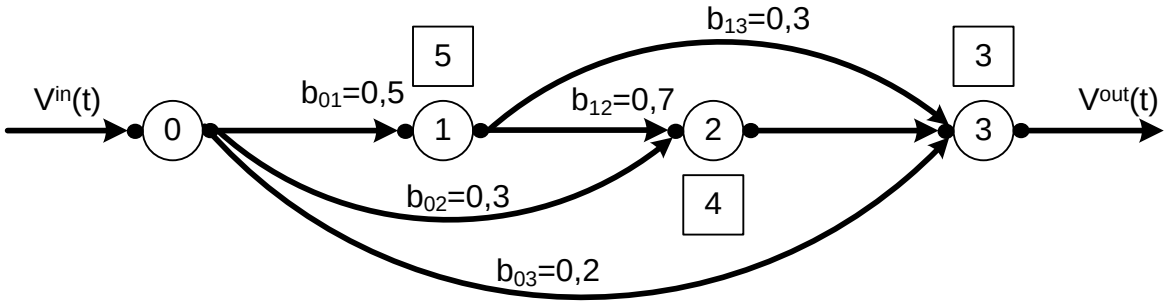


Рисунок 17. Пример графа технологической сети

Распределение объемов на выходах звеньев по направлениям указывается к началу расчетов в матрице $B = (b_{ij})$, $i,j = 0,1,2,3$. В данном примере ненулевые элементы матрицы приняты равными: $b_{01} = 0,5$; $b_{02} = 0,3$; $b_{03} = 0,2$; $b_{12} = 0,7$; $b_{13} = 0,3$; $b_{23} = 1$.

Величина потока на выходе сети $V_{max}^{out}(T+\Delta)$ (здесь Δ – максимальная задержка выхода сети относительно входа, определяемая числом звеньев на наиболее длинном маршруте обработки партии продукта в сети), определяется по формуле (28) как суммарный объем на выходе последнего звена сети x_{n-1} за период $[0; T+\Delta]$:

$$V_{max}^{out}(T+\Delta) = \sum_{\tau=0}^{T+\Delta} V_{n-1}^{out}(\tau) \qquad (28)$$

Вычислительный эксперимент состоял в расчете показателей, определяемых выражениями (25) - (28), при различных значениях объема продукта на входе сети с помощью алгоритма имитации движения партий продукта через сеть (см. гл.3, п.3.2, п.3.3). В первой серии расчетов моделировалось продвижение через сеть одной партии продукта объемом

$V^{in}(0)$. В эксперименте в нескольких прогонах модели на вход сети подавались партии объемами, последовательно равными *0; 6;…20* (*ед. прод./такт*). Ход расчета поясняется на рисунке 18 для варианта $V^{in}(0) = 6$ (*ед. прод./такт*). На схеме в скобках возле значений объемов указаны номера тактов, когда эти объемы появляются на входах/выходах звеньев.

В таблице 4 приведены результаты вычислительного эксперимента, полученные для данных рассматриваемого примера при нескольких значениях входа. На рисунке 19 эти данные представлены в виде графиков.

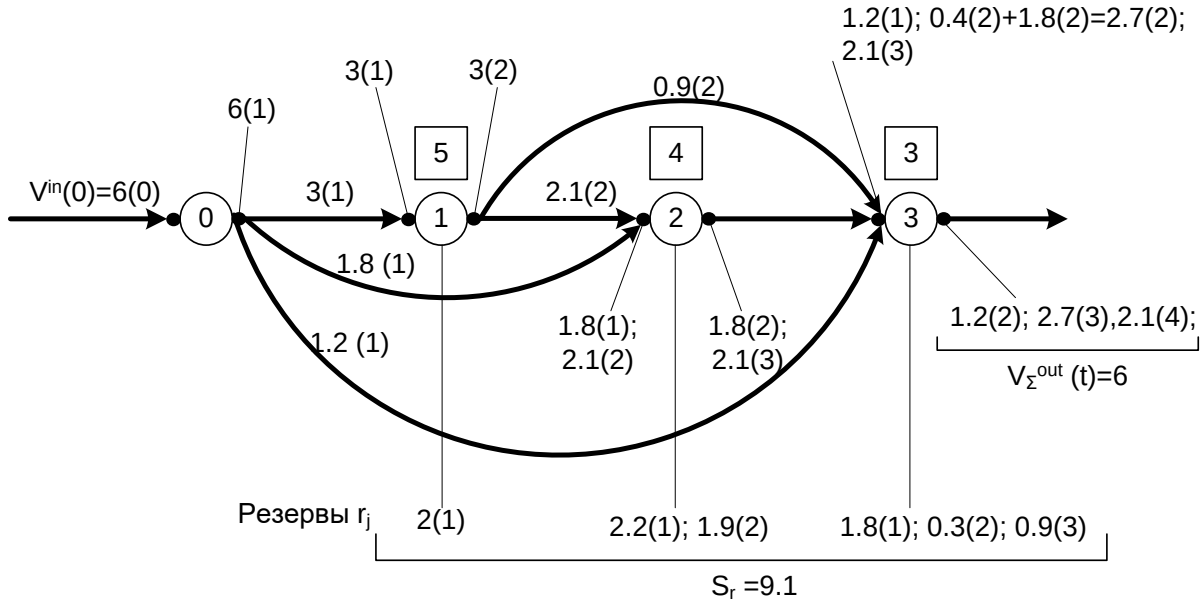


Рисунок 18. Граф технологической сети с указанием перемещения партий продуктов по установленным маршрутам

Таблица 4. Результаты вычислительного эксперимента

Объем на входе сети *Vin(0)* [ед.прод./такт]	Суммарный объем на выходе сети *Vout(T + Δ)* [ед.прод./такт]	«Штраф» за неполное использование произв-ти машин $\alpha r \times Sr$	«Штраф» за хранение запаса в накопителях машин $\alpha z \times Sz$	Суммарный штраф $S = \alpha r \times Sr + \alpha z \times Sz$ [усл. ден.ед.]
0	0,0	12,0	0,0	12,0
6	6,0	9,1	0,0	9,1
8	7,4	5,4	0,6	6,0
10	8,0	2,5	2,0	4,5

11	8,2	2,0	2,8	4,8
12	8,4	1,5	3,6	5,1
13	8,6	1,0	4,4	5,4
14	8,8	0,7	5,2	5,9
16	9,0	0,5	7,0	7,5
18	9,0	0,5	9,0	9,5
20	9,0	0,5	11,0	11,5

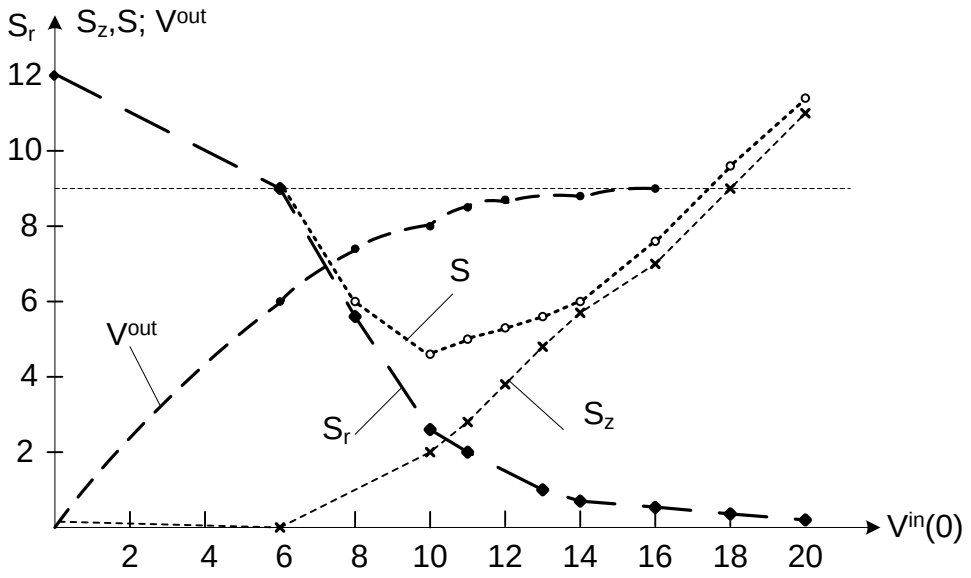


Рисунок 19. Зависимости величин потерь от объема потока на входе сети

Как можно видеть из таблицы 4 и рисунка 19, при увеличении входа объем потока на выходе сети ожидаемо растет, достигая за интервал в 4 такта при $V^{in}(0) = 16$ *ед.прод./такт* предельной максимальной величины, равной *9 ед.прод*, (заметим, что при этом *7* единиц продукции задерживается в накопителях машин). Такой вид зависимости выхода от входа является характерным для обрабатывающих звеньев и для сети в целом. Кривая суммарных потерь по двум указанным причинам имеет минимум, равный в данном случае *4,5 руб/(ед.прод/такт)* (эта строка выделена в таблице 4), достигаемый при объеме продукта на входе сети $V^{in}(0) = 10$ (*ед. прод./такт*).

В таблице 5 и на рисунке 20 представлены результаты моделирования хода обработки в данной сети потока в виде серий из четырех партий. Объемы

партий $V^{in}(t)$ в экспериментах последовательно принимались равными *4,0; 6,0; 7,0; 8,0; 10,0 ед.прод/такт*.

Как можно видеть из данных таблицы 5 и рисунка 20, с увеличением объема партий на входе сети характер зависимостей не изменился: резервы производительности уменьшаются, а запасы в накопителях растут. Минимальное значение суммарных потерь достигается при объеме партии на входе, равном 7 *ед. прод./такт* (строка выделена в таблице 5).

Таблица 5. Результаты моделирования процесса прохождения через сеть серии партий

Объем на входе сети Vin(t)× 4	Суммарный объем на выходе сети Vout∑ (Vout∑/ V∑)	«Штраф» за неполное использование произв-ти машин Sr	«Штраф» за хранение запаса в накопителях машин Sz	Суммарный штраф S = Sr + Sz
4 × 4 = 16	13,8 (0,86)	25,6	2,2	27,8
6 × 4 = 24	15,3 (0,64)	15,1	8,7	23,8
7 × **4** = 28	15,85 (0,57)	11,6	12,15	23,75
8 × 4 = 32	16,4 (0,51)	8,4	15,6	24,0
10 × 4 = 40	17,0 (0,43)	2,3	23,0	25,3
14 × 4 = 56	17,8 (0,32)	0,7	38,2	38,9

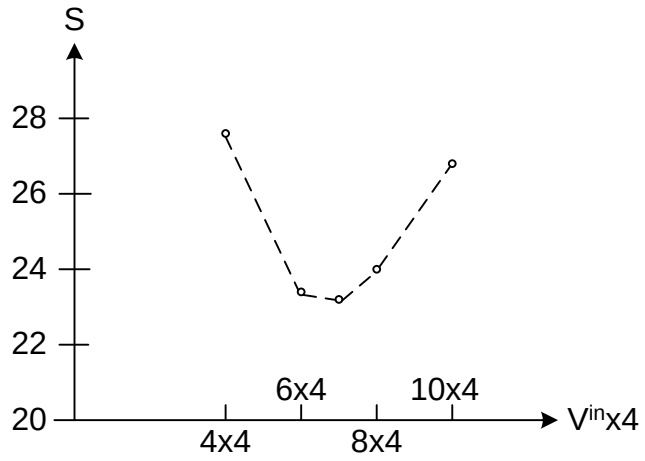


Рисунок 20. Зависимость суммарных потерь от объема партий на входе сети

Выводы по главе 3

1. Предложена структурная модель технологической сети в виде ориентированного графа. Рассмотрен частный случай задачи определения максимального потока в технологической сети, когда может быть применен известный метод Форда-Фалкерсона, основанный на понятии «разреза графа». Показано, что применительно к технологической сети к задаче может быть применен предложенный автором алгоритм, предполагающий определение оценки максимального потока и, следовательно, производительности сети путем просмотра ограниченного множества разрезов модельного графа.

2. Предложена модель сети как совокупности связанных моделей отдельных звеньев. В качестве модели технологического объекта (машины, аппарата, установки, звена сети), использована структура, состоящая из двух блоков: обрабатывающего (функционального) блока и накопителя, в который направляется часть объема входного продукта в случае, если этот объем превышает уровень производительности звена.

3. Предложены алгоритмы компьютерного моделирования движения через технологическую сеть входного одно- и многопродуктового потока по различным маршрутам.

4. Установлен ряд характерных для технологических сетей зависимостей, связывающих параметры входных и выходных потоков работ.

4 АДАПТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧКИЕ СЕТИ: РЕЗЕРВЫ РОСТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

4.1. Концепция адаптивных технологических сетей. Общая схема адаптации системы к требованиям производства

Материал данного параграфа опубликован в совместной статье автора с научным руководителем проф. А.В. Архиповым [67].

В предыдущих разделах диссертации предполагалось, что структуры сетей, характеристики звеньев, а также вид и объемные характеристики потоков работ, выполняемых сетью, являются заданными и фиксированными. Другими словами, речь шла об оценке производственных возможностей сети в режиме *текущего функционирования* (см. гл.1, п.1.2). В данном разделе рассматривается вопрос о планировании *развития* сети, то есть о целенаправленном изменении параметров, как самой сети, так и потоков выполняемых ею работ. Важность обоснования производимых изменений обусловлена значительной стоимостью работ по восстановлению, модернизации и обновлению технологических объектов, а также многовариантностью решений по распределению инвестиций между режимами работы производственной системы. В тех случаях, когда сеть, представляет собой комплекс жестко связанных машин, сопряженных по производительности, вопрос об увеличении производительности отдельного элемента целостного технологического объекта обычно не возникает, так как такое изменение нарушит согласованность звеньев единого комплекса. Однако, если машины комплекса или сети являются автономными и не связаны жесткими механическими связями, то для выбора рационального варианта развития комплекса в целом требуется проведение специального анализа потенциальной эффективности вложений в поддержание и

наращивание производительности отдельных звеньев. При этом представляется естественным требование учитывать, как сложившуюся структуру производственной программы, так и перспективы ее изменения в будущем. В любом случае одним из факторов потенциальной эффективности серийного, в особенности, мелкосерийного производства выступает *гибкость* технологической системы, ее способность адаптироваться к изменениям номенклатуры и объемов вырабатываемой продукции с обеспечением сопряженности оборудования, сбалансированности сети по производительности [13], [71], [79]. В более широком плане вопросы сбалансированности производства рассматривались в работах [48], [49].

При частой смене ассортимента продукции (в пределах установленных продуктовых групп) в загрузке звеньев сети могут иметь место значительные колебания, негативно влияющие на эффективность производства. Это связано с тем, что при реализации конкретного оперативного плана предварительно достигнутая сопряженность звеньев по производительности может быть нарушена. Сокращение подобных нарушений может быть обеспечено: 1) регулированием значений производительности звеньев и 2) целенаправленной коррекцией (в пределах технологических и организационных ограничений) технологических маршрутов отдельных потоков. В роли критериев эффективности подобных мер могут выступать различные показатели работы сети [67].

Возможности реализации управляющих воздействий на параметры сети и на структурные характеристики многопродуктового потока, по существу, определяют *гибкость* комплексного объекта, включающего технологическую сеть, входной поток продуктов и управляющий орган [80]. При наличии таких возможностей объект будем называть *адаптивной технологической сетью (АТС)* [67]. Вопросы обеспечения гибкости производственной системы рассматривались многими авторами (см., в частности, [9], [11], [13], [56], [57], [84], [93]).

Основной тезис, который развивается в данном разделе, формулируется следующим образом. При исследовании производственных систем дополнительные резервы роста эффективности дает совместное, в рамках единой модели, рассмотрение следующих объектов: технологических сетей (наиболее общей формы организации инструментальных средств, обеспечивающих производство продукции), системы управления и множества продуктов, выпускаемых или планируемых к обработке (выпуску) данной сетью. При совместном рассмотрении сети и потоков продуктов могут быть использованы несколько связанных моделей. Одна из моделей описывает прохождение заданного многопродуктового потока через заданную сеть и дает оценку производительности сети. Эта модель позволяет проводить имитационные (компьютерные) эксперименты с целью выявить зависимости производительности сети от оценок этого показателя для отдельных звеньев. Результаты экспериментов могут быть использованы при построении оптимизационной модели выбора новых (скорректированных) значений производительности звеньев, при которых производительность сети достигает наибольшего (или заданного) значения. Эту фазу моделирования и оптимизации можно назвать *параметрической адаптацией* сети к характеристикам обрабатываемого ассортимента [67].

Другим направлением адаптации сети является изменение в допустимых пределах маршрутов движения отдельных потоков, входящих в общий многопродуктовый поток. Как было ранее сказано, совокупность установленных технологических маршрутов каждого из потоков, движущихся через сеть, определяет структуру сети. Этап выбора оптимальной (или более рациональной) структуры сети определен, как этап *структурной адаптации* сети [67].

Одна из возможных схем построения адаптивной технологической сети (АТС) предполагает последовательное (поочередное) решение в циклическом режиме задач параметрической и структурной адаптации. Вариант алгоритма

реализации этой схемы представлен на рисунке 21. Ниже приведено содержание основных шагов этого алгоритма.

Шаг 1. Исследование потоков работ в производственной системе.

Шаг 2. Исследование характеристик (нормативов, ограничений) отдельных звеньев и технологической сети в целом.

Шаг 3. Моделирование прохождения потока через технологическую сеть.

Шаг 4. Анализ соответствия расчетных характеристик заданным требованиям. Если имеет место соответствие, то работа алгоритма завершается (шаг 6). Если соответствия нет, то переход к шагу 5

Шаг 5. Запуск процедуры анализа и управления адаптацией технологической сети

Шаг 6. Завершение работы алгоритма

Процедура анализа и управления адаптацией технологической сети

(1) Анализ возможности выполнения или завершения процедуры коррекции производительности звеньев.

(1) - А. Анализ возможности выполнения процедуры коррекции производительности звеньев:

если коррекция возможна, то переход к действию (1)-В;

если коррекция невозможна, то переход к действию (2).

(1) - В. Анализ признака завершения коррекции производительности звеньев:

если коррекция завершена, то переход к действию (2).

если коррекция не завершена, то запуск процедуры коррекции.

(2) Анализ возможности выполнения или завершения коррекции структуры сети.

(2) - А Анализ возможности выполнения процедуры коррекции структуры сети:

если коррекция возможна, то переход к действию (2)-В;

если коррекция невозможна, то переход к действию (3).

(2) - В Анализ признака завершения процедуры коррекции структуры сети:

если коррекция завершена, то переход к действию (3);

если коррекция не завершена, то запуск процедуры коррекции структуры сети.

(3) Вывод о несоответствии характеристик потока работ параметрам технологической сети (заданные параметры производительности сети не могут быть достигнуты).

(4) Завершение работы процедуры анализа и управления адаптацией сети.

Завершение работы алгоритма.

Процедура коррекции производительности звеньев сети

(процедура параметрической адаптации)

(1) Выполнение алгоритма коррекции.

Назначение новых значений производительности звеньев.

(2) Завершение работы процедуры коррекции производительности звеньев сети.

Переход к шагу 3 алгоритма.

Процедура коррекции структуры технологической сети

(процедура структурной адаптации)

(1) Выполнение алгоритма коррекции.

Назначение новых маршрутов движения потоков.

(2) Завершение процедуры коррекции структуры сети.

Переход к шагу 3 алгоритма.

Возможные варианты постановок задач системной оптимизации параметров адаптивной технологической сети (АТС) приведены в таблице 6.

Представленные в таблице 6 варианты постановок задач приведены также в статье автора [67].

Таблица 6. Варианты постановок задач оптимизации параметров АТС

Исходные данные	Объекты моделирования	Результаты
Вариант 1		
Регулярный многопродуктовый поток с фиксированными характеристиками (состав, структура, маршруты потоков, объемы на входе сети; характеристики звеньев)	Процесс движения потоков через сеть	Расчетные значения производительности сети; величины запасов в накопителях звеньев; показатели использования номинальной производительности звеньев
Вариант 2		
Регулярный многопродуктовый поток с фиксированными характеристиками (состав, структура, маршруты потоков, объемы на входе сети); производительности звеньев по видам продукции, заданные диапазонами своих возможных значений	Процесс генерирования комбинаций значений производительности звеньев из допустимых диапазонов и выбора оптимальных по принятым критериям комбинаций уровней производительности звеньев	Определение для каждой комбинации оценок производительности звеньев - расчетных значений производительности сети, - величин запасов в накопителях звеньев, - показателей уровня использования производительности звеньев
Вариант 3		
Регулярный многопродуктовый поток с фиксированными характеристиками (состав, структура потоков, объемы на входе сети); заданные допустимые варианты	Процесс генерирования и оценки вариантов структур сети как комбинаций допустимых маршрутов отдельных потоков. Выбор оптимальных	Рассчитанные для каждого варианта структуры сети - значения ее производительности, - величины запасов в накопителях звеньев,

маршрутов потоков, оценки предпочтительности вариантов; число звеньев, их производительности по видам продукции	комбинаций по принятым критериям	- показатели использования номинальной производительности звеньев
Вариант 4		
Регулярный многопродуктовый поток с фиксированными характеристиками; заданные допустимые варианты маршрутов потоков, оценки предпочтительности вариантов; число звеньев, их производительности по видам продукции	Интегрированный процесс, объединяющий две процедуры: а) генерирования и оценки вариантов структур сети как комбинаций допустимых маршрутов отдельных потоков и б) генерирования значений производительности звеньев из допустимых диапазонов. Выбор оптимальных сочетаний	Рассчитанные для каждой пары объектов (структуры сети и вектора значений производительности звеньев) значения производительности сети; величины запасов в накопителях звеньев; показатели использования производительности звеньев

4.2 Модель и метод оптимальной коррекции производительности звеньев технологической сети

Рассмотрим задачу повышения производительности сети в случае, когда маршруты потоков работ заданы и не могут быть изменены, а значения производительности звеньев могут варьироваться в установленных заранее пределах. Задача управления производительностью звеньев и сети в целом может быть сформулирована в различных постановках. В любом случае в качестве модели, связывающей выходные показатели движения потоков продуктов через технологическую сеть с характеристиками сети, подходящим

инструментом является представленная в гл. 3 диссертации имитационная процедура. При фиксированных маршрутах, т.е. при заданной структуре сети и заданных значениях производительности звеньев, она позволяет рассчитать величины объемов продуктов на выходе сети, на входах и выходах каждого звена и в накопителях, а также некоторые другие оценочные показатели (см. гл. 3, п. 3.2, п. 3.3). При принятии этой модели в качестве средства описания процесса основным вопросом становится выбор критериев оптимизации уровня производительности сети. Как представляется, все возможные критерии по своему содержанию могут быть разделены на две группы.

Первую группу составляют критерии оценивающие величину (или величины) межоперационных запасов, которые аккумулируются в накопителях звеньев сети. В другую группу могут быть включены критерии, характеризующие уровень использования производительности звеньев. В качестве критерия также может быть использован показатель суммарных потерь вследствие неполного использования производительности оборудования и возникновения сверхнормативных запасов на переходах. Этот критерий и будет использован в дальнейшем.

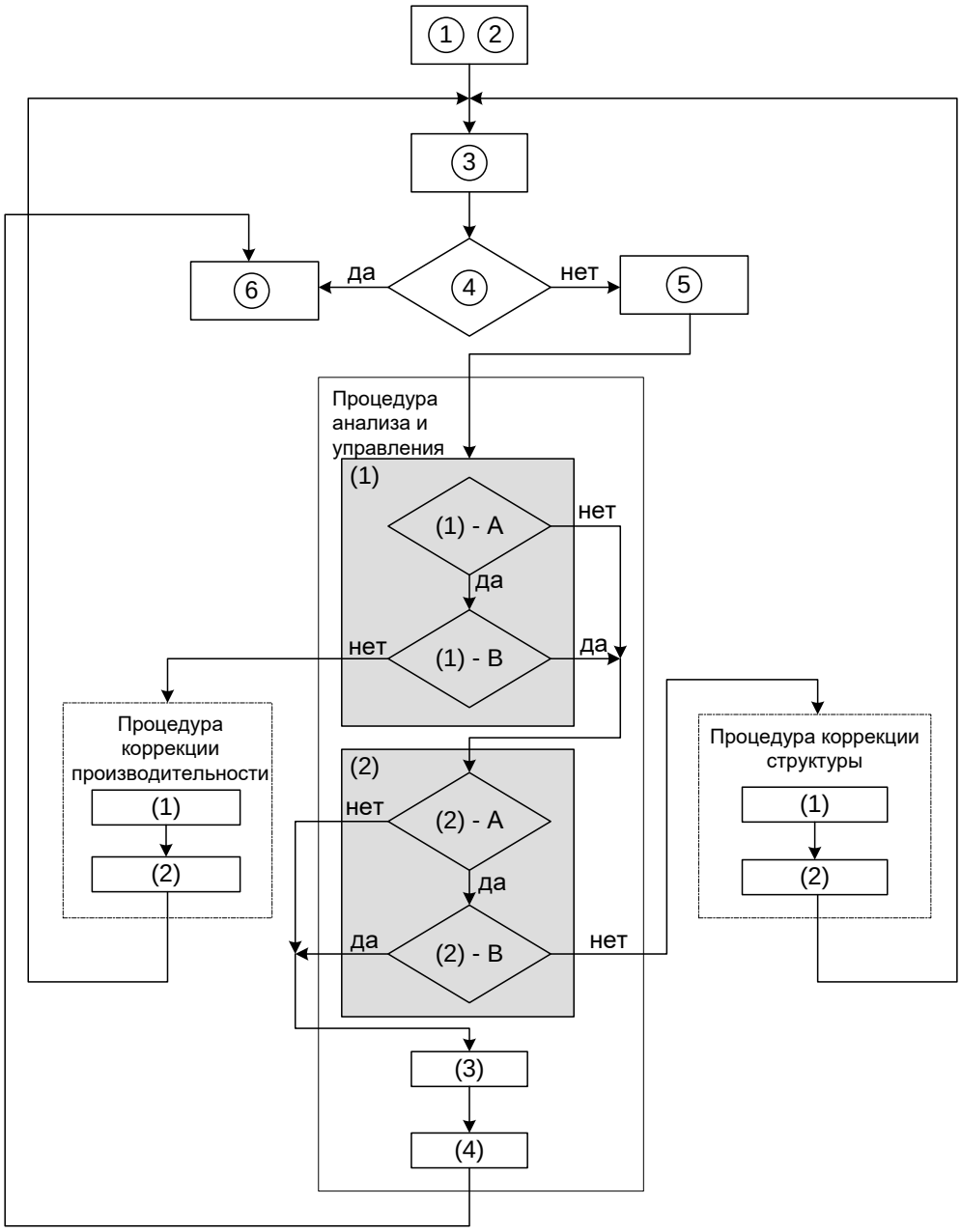


Рисунок 21. Возможная принципиальная схема процесса адаптации технологической сети к характеристикам входных потоков продуктов (циклическое выполнение процедур параметрической и структурной адаптации)

(цифры в кружках соответствуют номерам шагов алгоритма; цифры в скобках – номерам действий в соответствующих процедурах)

Далее рассматриваются два метода коррекции производительности звеньев сети. Первый предполагает генерирование и анализ некоторого множества вариантов коррекции текущих значений производительности звеньев. На основании сравнения вариантов по принятому набору критериев устанавливается наиболее предпочтительный вариант. Этот метод сводится к полному или частичному перебору комбинаций технически возможных уровней производительности машин. Второй метод реализует другую схему. Идея метода состоит в определении по матрице связей звеньев сети таких значений производительности каждого звена, при которых суммарные потери равны заданным нормативным значениям, в частности, равны нулю. Такие значения условно названы «идеальными», так как могут быть технически нереализуемыми. Поэтому на следующем этапе коррекции найденные значения сопоставляются с диапазонами допустимых (практически реализуемых) уровней производительности каждого звена, и в этих диапазонах подбираются значения, наиболее близкие к идеальным. Метод отличается логической простотой и представляется более подходящим для оперативных расчетов. Рассмотрим указанные методы более подробно.

При изложении первого метода будем полагать, что производительность j-го звена $(j = 1,\ldots,n)$ может изменяться в своем диапазоне дискретно. Примем также, что начальные производительности звеньев равны некоторым базовым («номинальным») значениям. Изменение производительности звена ведет либо к увеличению, либо к уменьшению затрат на обеспечение его функционирования: при переходе на более высокие уровни требуются дополнительные расходы, при переходе на нижележащие уровни появляется возможность экономии расходов. Величины затрат при функционировании j-го звена при различных допустимых уровнях производительности могут быть представлены K_j-мерным вектором $C_j = (c_{1j}, c_{2j}, \ldots, c_{kj}, \ldots, c_{Kj})$, представляющим собой упорядоченный набор значений затрат при функционировании звена с k-м уровнем производительности, K_j – принятое число градаций уровня этого

показателя для *j*-го звена. Одной из частей этих затрат является стоимость запасов продуктов, аккумулируемых в накопителях звеньев и относящихся к незавершенному производству. Размеры и распределение этих запасов по машинам сети («профиль» запасов) при фиксированной структуре входного потока и маршрутах движения продуктов в сети непосредственно зависят от соотношения производительности звеньев и, что важно для практического использования, могут быть оперативно установлены как в производственных условиях, так и расчетным путем. Это дает основание принять суммарную величину запасов в накопителях в качестве критерия при поиске рационального варианта значений производительности машин в данной сети.

В общей постановке задача коррекции производительности машин формулируется в следующем виде. Для заданного входного потока $V^{in}(t)$, $t = 0,1,\ldots,T$ и при заданных начальных (базовых) значениях производительности звеньев, в предположении, что начальные объемы продукции в накопителях всех звеньев $V_j^z(0)$ равны нулю, предварительно установлена (алгоритм см. гл. 3) расчетная величина максимального выходного потока $V_{max}^{out}(T)$ (если поток многопродуктовый, то соответствующие величины установлены для всех составляющих его частных потоков). Требуется: определить такие новые уровни производительности звеньев сети, при которых при неизменном потоке на входе сети $V^{in}(t)$ достигается величина максимального потока на выходе сети $V^{out}(T)$, которая должна быть не менее плановой величины $V_{пл}^{out}(T)$, и при этом суммарные затраты на коррекцию значений производительности звеньев должны быть минимальными. Если обнаруживается, что плановая величина $V_{пл}^{out}(T)$ недостижима, то эта величина корректируется в сторону уменьшения, и процесс поиска подходящих уровней производительности звеньев повторяется.

Очевидно, что плановая величина $V_{пл}^{out}(T)$, которая задается предварительно, и искомая величина выходного потока сети $V^{out}(T)$, должны удовлетворять следующим ограничениям

$$V^{in}(0) \geq V^{out}(T) \geq V_{пл}{}^{out}(T) > V_{max}{}^{out}(T).$$

Среди возможных вариантов формализации данной задачи выберем следующую схему.

Пусть набор индексов $\{k^{(j)}\}, j = 1,\ldots,n$ характеризует начальное состояние (комбинацию из уровней производительности) каждого из звеньев сети. Такую комбинацию будем называть режимом работы сети. Конечное множество режимов обозначим через $U = \{u_g\}, g = 1,\ldots, g_{max}$. Целевая функция задачи, требующая минимизации суммарных затрат, связанных с работой всех звеньев сети в фиксированных режимах, может быть записана так:

$$F(k^{(1)},k^{(2)},\ldots,k^{(n)}) = F(U) = \sum_{j=1}^{n} c_k{}^{(j)}{}_j \rightarrow \min_{U} \qquad (29)$$

(здесь $c_k{}^{(j)}{}_j$ – затраты, связанные с работой j-го звена с уровнем производительности, помеченным индексом $k^{(j)}$).

Ограничение на требуемый объем потока на выходе сети имеет вид:

$$V^{out} \geq V_{пл}{}^{out}(T) > V_{max}{}^{out}(T)\,. \qquad (30)$$

В общем случае могут быть наложены аналогичные ограничения и на отдельные потоки, составляющие многопродуктовый поток. В этом случае будем иметь набор ограничений:

$$V_i{}^{out} \geq V_{плi}{}^{out}(T) > V_{maxi}{}^{out}(T),\ i = 1,\ldots,m \qquad (31)$$

(здесь m – число потоков различных продуктов в многопродуктовом потоке, проходящем через технологическую сеть).

Очевидно, что целевая функция (29) достигает минимального значения в том случае, когда для сети выбран режим, при котором каждая из машин работает с минимально возможным для нее значением производительности, обеспечивая максимальную экономию ресурсов. Однако при этом могут быть нарушены требования (30) или (31), что ведет к невыполнению планов

выпуска продукции по объемам и срокам и, следовательно, к экономическим потерям. Решение задачи сводится к поиску такого режима $u^{(opt)} \in U$, т.е. такой комбинации значений производительности машин, при которой указанные ограничения выполняются и суммарная стоимость режима работы машин минимальна.

Как было отмечено, начальные объемы продукции в накопителях звеньев приняты равными нулю, из чего следует, что объем выходного потока не может превышать объем входного потока. Также отметим, что коррекция производительности в сторону повышения направлена на увеличение объема потоков на выходе, который, как логично потребовать, должен превышать объем максимального потока, достигнутый при исходных характеристиках сети, что и отражено в неравенствах (30) и (31).

Нетрудно убедиться, что выбрав некоторую комбинацию уровней производительности всех звеньев, можно с помощью модели, имитирующей движение потоков в сети (см. гл. 3 диссертации), получить оценки потоков на выходе и проверить выполнение ограничений (30) или (31). В силу ограниченности интервалов возможных значений и целочисленности переменных $k^{(j)}$ количество комбинаций будет конечным, хотя, возможно, при больших значениях числа звеньев и градаций уровней производительностей может достигать значительной величины. В таких случаях требуется указать пути построения алгоритмов, сокращающих или полностью исключающих полный перебор, возможно, ценой некоторого приемлемого отклонения результата от оптимального.

В данном исследовании предлагается эвристический метод, позволяющий сократить объем перебора при поиске подходящего варианта коррекции производительности звеньев при вполне удовлетворительном (по величине дополнительных затрат) результате. Метод основан на применении приоритетной схемы [10], состоящей в разработке правил назначения для звеньев сети (вершин модельного графа) численных показателей

(приоритетов) и организации расчетов по методу последовательного включения уровней производительности машин в рассматриваемые комбинации в порядке убывания приоритетов.

Правила назначения приоритетов могут быть различными и базироваться на тех или иных основаниях. Формальные основания, если они могут быть выдвинуты, позволяют построить строгий метод получения оптимального результата. Если в качестве оснований принимаются некоторые предположения, оцениваемые как «разумные», но формально не доказанные, то метод относят к группе эвристических [7], [10]. В данном случае представляется вполне логичным использовать при расчетах приоритетов звеньев информацию о величинах запасов продуктов, аккумулированных в их накопителях в результате первого прогона модели движения продуктов через сеть при некоторых начальных (базовых, номинальных) значениях производительности, а также данные о резервах неиспользованной производительности (производственной мощности) звеньев.

Очевидно, что чем больше запас продуктов в накопителе, тем больше дефицит производительности данного звена (на текущем интервале времени) и, соответственно, в большей степени звено «нуждается» в увеличении своих производственных возможностей. Такому звену должен быть присвоен более высокий приоритет при корректировке производительности в сторону увеличения.

Если при первом прогоне модели для группы звеньев значения производительности, установленные на начальном уровне, использованы не полностью, то для этих звеньев, очевидно, необходима коррекция в сторону уменьшения, зависящая от величины неиспользованного резерва.

Предлагается выполнять расчет с использованием данных о текущих запасах в накопителях и о неиспользованных резервах производительности по следующей формуле:

$$r_j = \frac{\left(V_j^z(t-1) + V_j^{in}(t) - p_j(t)\right)}{p_j(t)}, \quad j = 1,...,n \qquad (32)$$

где

r_j – значение приоритета j-го звена на текущем шаге t процедуры коррекции;

$V_j^z(t-1)$ – величина запаса в накопителе j-го звена к моменту времени t (эта величина достигнута на предыдущем шаге);

$V_j^{in}(t)$ – объем потока на входе j-го звена в момент времени t;

$p_j(t)$ – текущее значение производительности j-го звена в момент времени t.

При расчете приоритетов по формуле (32) предполагается, что нормативные объемы запасов в каждом звене равны нулю. Если для j-го звена нормативный запас имеет некоторое ненулевое значение $V^{норм}$, то числитель в формуле следует уменьшить на величину этого норматива.

Согласно формуле (32), если накопленный запас и текущее значение объема потока на входе звена превышают уровень его производительности, то приоритет r_j получит положительное значение, которое будет возрастать с относительным увеличением этого превышения. Очевидно, что соразмерно с этим превышением уровни производительности таких звеньев желательно увеличить. Нетрудно заметить, что при использовании приведенной формулы значение приоритета показывает, что сумма объема на входе и в накопителе в $(r_j + 1)$ раз превышает производительность. Поэтому для минимизации запасов желательно иметь значения приоритетов, близкие к нулевым значениям. Представляется очевидным одно из возможных правил коррекции: для получения нулевых запасов в накопителе звена его производительность следует увеличить в $(r_j + 1)$ раз. При этом велика вероятность, что новое скорректированное значение выйдет из допустимого диапазона. В этом случае следует принять в качестве нового уровня производительности ближайшее допустимое значение.

Если накопленный запас для рассматриваемого звена отсутствует или меньше нормативного, и входной поток по объему не превышает текущего

значения производительности, то значение приоритета r_j будет нулевым или отрицательным. В первом случае коррекция производительности не требуется. Во втором случае отрицательное значение приоритета служит признаком того, что для данного звена показатель производительности желательно уменьшить. Значение приоритета $r_j = -1$ соответствует отсутствию потока на входе звена и запаса в его накопителе, что требует снижения его производительности до нуля (исключение звена из производственного процесса, вынужденный простой технологической машины). Таким образом, при отрицательном значении приоритета, чем меньше (больше по модулю) его величина, тем более существенная коррекция производительности в сторону уменьшения требуется для данного звена. Зависимость рекомендуемого уровня производительности от значения приоритета может быть принята в виде ступенчатой функции с числом возможных значений равным числу градаций показателя производительности. Пример такой функции приведен на рисунке 22.

Выбор формального способа расчета приоритетов звеньев, устанавливающих для них в условной количественной форме направление и степень необходимой (или желательной) коррекции уровня производительности, является первым этапом процедуры. На следующих этапах необходимо установить очередность рассмотрения и коррекции двух групп звеньев (группа звеньев, имеющих запасы продуктов в накопителях, и группа звеньев, имеющих резервы мощностей), а затем реализовать действия по коррекции. При этом необходимо учитывать, что в общем случае после коррекции производительности какого-либо звена при последующем прогоне модели движения потоков по сети вполне возможно, что изменятся объемы продуктов на входах других звеньев и, следовательно, на их выходах и в накопителях. Поэтому после проведения локальной коррекции одного из звеньев следует пересчитать приоритеты остальных звеньев сети. Процедура коррекции приобретает вид циклического итерационного процесса.

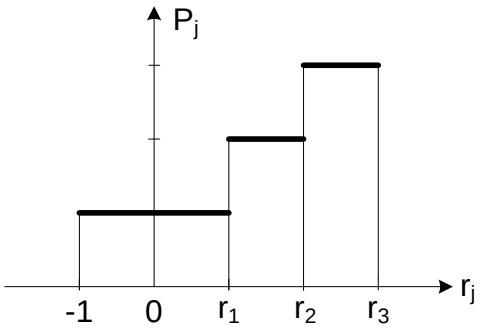


Рисунок 22. Пример зависимости производительности звена от величины его приоритета при заданных градациях в диапазоне возможных значений

Представляется логичным предположить, что при коррекции в сторону увеличения производительности последовательно просматриваемых звеньев, суммарные запасы в накопителях не увеличиваются, хотя и могут по-иному перераспределяться между звеньями. Поэтому итерационный процесс можно считать сходящимся к некоторому конечному состоянию. Признаком остановки процесса может быть проверка выполнения однократной коррекции (возможно, без изменения уровня производительности) каждого звена с положительным приоритетом.

Укрупненная схема алгоритма решения задачи, отражающая логику процесса, представлена на рисунке 23. Содержание основных шагов и пример применения данного алгоритма представлены в Приложении 1.

Перейдем к изложению второго метода выбора уровней производительности машин, входящих в сеть, при наличии требований к нормативной величине запасов продуктов в накопителях.

Будем полагать, что задана технологическая сеть, включающая *n* звеньев, и установлены маршруты движения, в общем случае, многомерного потока.

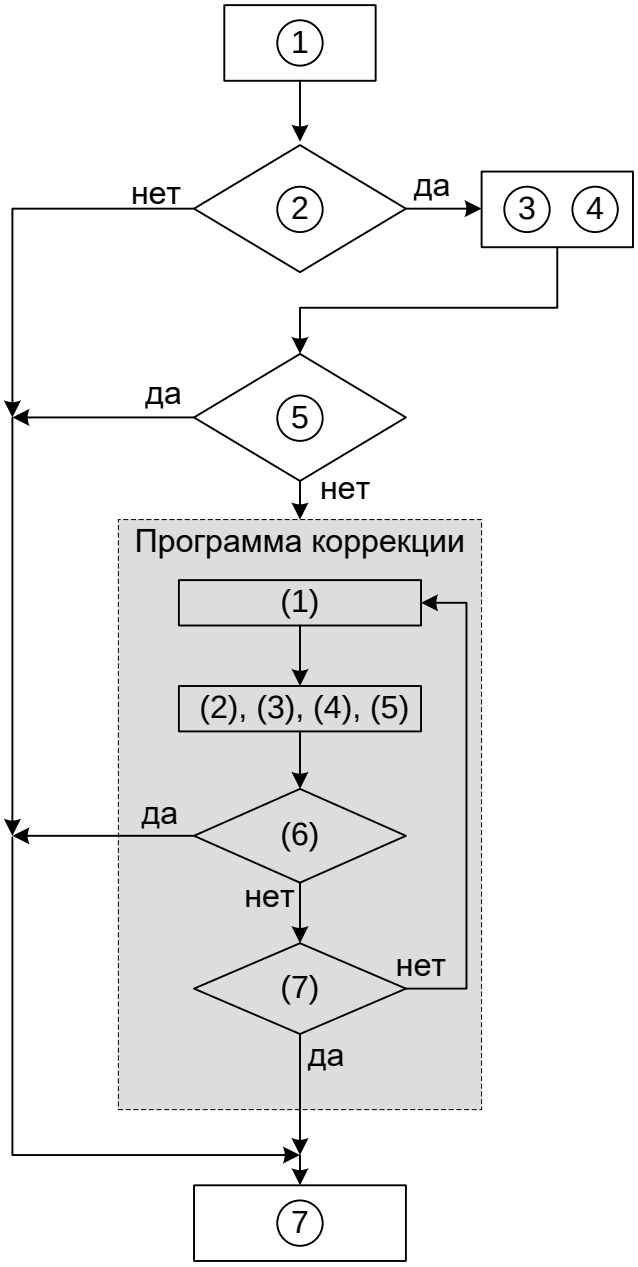


Рисунок 23. Блок-схема алгоритма коррекции производительности звеньев с использованием
метода ограниченного перебора режимов работы сети
(цифры в кружках соответствуют номерам шагов алгоритма (Приложение 1),
цифры в скобках – номерам действий программы коррекции)

Предположим также, что из производственных соображений (обеспечение непрерывности процессов, демпфирования сбоев и пр.) для звеньев заданы нормативные величины межоперационных запасов, аккумулируемых в накопителях. Обозначим эти величины через h_j, $j = 0,1,2,\ldots,n-1$. Нормативы могут быть установлены как в абсолютных величинах, фиксированных для каждого звена, так и в долях от величины входного потока. Начальные запасы в накопителях считаются равными нулю. Для звеньев указаны диапазоны допустимых (разрешенных) значений производительности $\Delta_j = [d_j^{min}; d_j^{max}]$. Допустимые значения производительности в указанных диапазонах могут изменяться непрерывно (плавное регулирование производительности) либо дискретно (конечное число фиксированных уровней производительности). Задача состоит в том, чтобы установить такие значения производительности каждого звена p_j^*, $j = 0,1,2,\ldots,n-1$, принадлежащие соответствующим диапазонам Δ_j, при которых объемы продуктов в накопителях, простои машин или суммарные потери будут близки к заданным нормативным значениям.

Процедура решения задачи включает два этапа. На первом этапе устанавливаются расчетные уровни производительности машин, при которых достигается равенство значений критериев (например, потерь из-за простоев и запасов продуктов в накопителях) своим нормативным значениям. При этом не учитываются ограничения в виде диапазонов их возможных значений. Установленные уровни производительности можно условно назвать «идеальными», так как они могут быть технически нереализуемы. Если диапазоны Δ_j для всех машин непрерывны, и найденные идеальные значения им принадлежат, решение задачи заканчивается: эти значения принимаются в качестве искомых. Если же идеальные значения не принадлежат заданным диапазонам, либо, в случае дискретных допустимых значений, не совпадают с разрешенными уровнями, выполняется второй этап процедуры.

На втором этапе для каждого идеального значения производительности подбирается ближайшее к нему значение, принадлежащее диапазону допустимых значений. Очевидно, что при этом возможно некоторое увеличение запасов в накопителях.

Рассмотрим этапы процедуры решения задачи более подробно.

Идея алгоритма реализации первого этапа весьма проста и базируется на балансовом соотношении, справедливом для каждого звена сети:

$$V_j^{in}(t) = V_j^z(t) + V_j^{out}(t), \qquad (33)$$

где

$V_j^{in}(t)$ – объем потока на входе j-го звена в момент времени t, равный сумме потоков продуктов, поступающих в данный момент с выходов звеньев, связанных с j-м звеном;

$V_j^z(t)$ – объем продуктов, направляемых в накопитель j-го звена в момент времени t;

$V_j^{out}(t)$ – объем потока на выходе j-го звена в момент времени t.

Формула (33) с пояснениями приведена также в статье автора [70].

Предположим, что нормативы запасов в звеньях заданы в виде долей h_j от объемов соответствующих входных потоков, т. е. должно выполняться условие $V_j^z(t) = V_j^{in}(t)h_j$. Тогда выражение (33) после очевидных преобразований примет вид:

$$V_j^{in}(t)(1 - h_j) = V_j^{out}(t). \qquad (34)$$

Напомним, что максимальный объем потока на выходе звена в течение периода времени, равного такту, равен его производительности p_j, так что правые части выражений (34) для всех звеньев следует принять равными p_j. Объемы входных потоков, одновременно являющиеся выходами других звеньев, связанных с j-м звеном, также будут определяться производительностями соответствующих звеньев с учетом долей потоков,

направляемых на вход *j*-го звена. С учетом этих соображений соотношение (34) может быть записано в виде:

$$\sum_{k \in K_j} p_k b_{kj} (1 - h_j) = p_j, \; j = 0,1,2,\ldots,n\text{-}1, \qquad (35)$$

где

K_j – множество машин (звеньев сети), связанных с *j*-й машиной;

b_{kj} – доля выходного потока *k*-го звена $(k \in K_j)$, направляемая на вход *j*-го звена, $0 \le b_{kj} \le 1$.

Соотношения (35) легко формируются по модельному графу сети с использованием модифицированной матрицы смежности, названной ранее (см. гл.3, п.3.3) матрицей распределения потоков $B = (b_{kj})$, указывающей доли выходного потока *k*-го звена, поступающие на вход *j*-го звена. Совокупность этих соотношений представляет собой систему уравнений относительно искомых значений производительности звеньев, обеспечивающих баланс входов и выходов каждого звена и сети в целом при нормативных уровнях запасов в накопителях. Примем, что звено с индексом «0» в графе сети представляет собой вершину-источник с производительностью, равной заданному объему потока, входящего в сеть ($p_0 = V^{in}$), а звено с индексом

$(n–1)$ – вершину-сток, через которую суммарный поток покидает сеть. В этом случае путем последовательных подстановок с использованием матрицы распределений потоков $B = (b_{kj})$ несложно последовательно рассчитать искомые производительности всех звеньев. Поясним алгоритм примером.

Пусть технологическая сеть представлена модельным графом, показанным на рисунке 24 (цифры у дуг, исходящих из вершин x_0 и x_2, указывают доли выходного потока звена, направляемые по данной дуге). Сеть включает шесть звеньев (вершин), занумерованных от *0* до *5*.

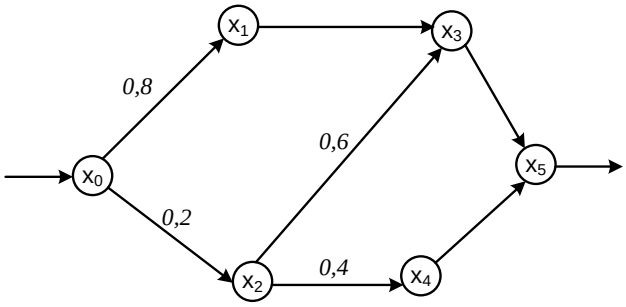


Рисунок 24. Модель технологической сети в виде ориентированного графа

Нормативы межоперационных запасов h_j , $j = 0,1,...5$ заданы в долях объемов входных потоков и имеют следующие значения:

$h_0 = 0,1$; $h_1 = 0,15$; $h_2 = 0,05$; $h_3 = 0,1$; $h_4 = 0,1$; $h_5 = 0,15$.

Объем потока на входе сети равен *10 ед*. ($V^{in} = 10$).

Доли выходных потоков звеньев с индексами $j=0$ и $j=2$ для примера приняты следующими: $b_{01} = 0,8$; $b_{02} = (1– b_{01}) = 0,2$; $b_{23} = 0,6$; $b_{24} = (1– b_{23}) = 0,4$ (указаны на рисунке).

Данные о допустимых диапазонах значений производительности звеньев на данном этапе решения задачи не используются.

Просматривая поочередно звенья сети, начиная с нулевого, запишем для каждого из них уравнения, из которых последовательно определяются искомые идеальные значения производительности звеньев:

$p_0 = V^{in} = 10\ (1 – h_0) = 9$

$p_1 = p_0\, b_{01}\, (1 – h_1) = (9 \times 0,8)(1 – 0,15) = 7,2 \times 0,85 = 6,12$

$p_2 = p_0\, b_{01}\ (1 – h_2) = (9 \times 0,2)(1 – 0,05) = 1,8 \times 0,95 = 1,71$

$p_3 = (p_1\, b_{13} + p_2\, b_{23})(1 – h_3) = (6,12 \times 1 + 1,71 \times 0,6) \times 0,9 =$

$= (6,12 + 1,03) \times 0,9 = 6,44$

$p_4 = p_2\, b_{24}\, (1 – h_4) = (1,71 \times 0,4)(1 – 0,1) = 0,68 \times 0,9 = 0,612$

$p_5 = (p_3\ b_{35} + p_4\ b_{45})(1 – h_4) = (6,44 \times 1 + 0,612 \times 1)(1 – 0,15) = 5,99.$

Расчет по модели движения партии через сеть показывает, что сумма запасов в накопителях всех звеньев равна *4,01 ед*., т.е. баланс соблюдается:

объем потока на входе сети равен сумме объема на ее выходе и суммарного запаса в накопителях. Если потребовать нулевых запасов во всех накопителях и нулевых простоев машин, т.е. обеспечить идеальное сопряжение звеньев по производительности, то искомые значения этих показателей для звеньев будут следующими: $p_0 = 10;\ p_1 = p_0 b_{01} = 8;$

$p_2 = p_0 b_{01} = 2;\ p_3 = (p_1 b_{13} + p_2 b_{23}) = 9{,}2;$

$p_4 = p_2 b_{24} = 0{,}8;\ p_5 = (p_3 b_{35} + p_4 b_{45}) = 10.$

Как и следовало ожидать, в этом случае объемы входного и выходного потоков сети оказались равными по величине.

Заметим, что расчет смещения по времени выхода относительно входа здесь не приводится. Нетрудно показать, что в данном случае задержка выхода относительно входа составит *4* такта (по принятому предположению каждое звено задерживает поток на интервал, равный такту; в данном примере максимальное число звеньев в пути из звена x_0 до звена x_5 равно *4*).

При изложении процедуры коррекции уровней производительности не было учтено то обстоятельство, что на входы звеньев могут приходить партии продуктов в различные такты временной шкалы. Это в общем случае делает неопределенным назначение производительности звена. Уточним изложенную процедуру.

Пусть заданы маршруты движения партий продуктов в сети, нагрузки на маршруты и величина входного потока (объем партии и количество партий, поступающих на вход в последовательные такты принятой дискретной шкалы времени). Полным соответствием объема работ потенциалу сети назовем ситуацию, когда при выполнении работ каждая машина сети в период своей занятости работает с нормативной производительностью (без простоев) и при этом в накопителях машин отсутствуют запасы продуктов. В этом случае сеть будем считать *полностью сбалансированной.*

Сеть назовем *условно сбалансированной*, если суммарные потери из-за неполного использования нормативной производительности машин и образования запасов в накопителях удовлетворяют заданным ограничениям.

Состояния полной или условной сбалансированности достигаются путем подбора уровней производительности машин, так, чтобы они наилучшим образом соответствовали заданным характеристикам потока работ. Другими словами, для каждой машины и для каждого такта в период ее занятости должны выполняться условия:

- для обеспечения полной сбалансированности сети

$$V_j^{in}(t) = \sum_{k \in K_j} V_{kj}^{out}(t) = p_j; \qquad (36)$$

- для обеспечения условной сбалансированности сети

$$| V_j^{in}(t) - p_j | \le \Delta. \qquad (37)$$

Рассмотрим условия, при которых может быть обеспечена полная сбалансированность сети и укажем формальные признаки ее достижимости.

Пусть технологическая сеть задана своими матрицами смежности $M = (\mu_{ij})$, ($\mu_{ij} = 1$ или 0 в зависимости от того, имеется или отсутствует в графе дуга $i \to j$) и распределения потоков $B = (b_{ij})$, $0 \le b_{ij} \le 1$, $B_i = \sum b_{ij} = 1$.

Длиной части (фрагмента) q-го маршрута от начального звена сети до звена j (обозначим эту длину через $L[0;j]_q$) назовем число звеньев (машин), через которые проходит партия продукта до поступления на вход j-го звена. Если j-е звено является общим для нескольких маршрутов (назовем его звеном соединения потоков), то объемы продуктов, поступающих на его вход *в одном и том же такте* должны суммироваться. Для обеспечения сбалансированности звена необходимо принять его уровень производительности равным рассчитанной сумме. Это действие будет возможным, если все потоки, сходящиеся в j-ом звене, пройдут по своим маршрутам пути одинаковой длины. Таким образом, может быть сформулировано условие достижимости состояния сбалансированности сети:

для каждого звена соединения потоков длины частей проходящих через звено маршрутов от начального до рассматриваемого звена должны быть равными между собой. Формально условие может быть выражено в следующем виде.

Пусть Q_j – множество индексов звеньев соединения потоков; $(q1,\ldots,qk)_j$ – индексы (номера) маршрутов, проходящих через j-е звено. Тогда полная сбалансированность сети может быть достигнута, если

$\forall\ j \in Q_j$ выполняются условия $L[0;j]_{q1} = L[0;j]_{q2} = \ldots = L[0;j]_{\mathrm{qk}}$. (38)

При выполнении этого условия достаточно по известному значению объема на входе и заданной матрице распределения потоков назначить производительности всех звеньев так, чтобы имели место равенства

$$\forall\ j \in Q_j \quad p_j = V_j^{in}(t) = \sum_{k \in K_j} V_{kj}^{out}(t)\ , \tag{39}$$

где

K_j – множество номеров звеньев, для которых некоторые из исходящих дуг входят в j-е звено;

Приведем пример. Рассмотрим технологическую сеть, представленную в виде ориентированного графа на рисунке 25.

Продукты обрабатываются в сети по шести маршрутам (последовательности номеров звеньев):

(1): < 0,1,3,7 >, (2): < 0,1,4,7 >, (3): < 0,1,5,7 >,

(4): < 0,2,3,7 >, (5): < 0,2,5,7 >, (6): < 0,2,6,7 >.

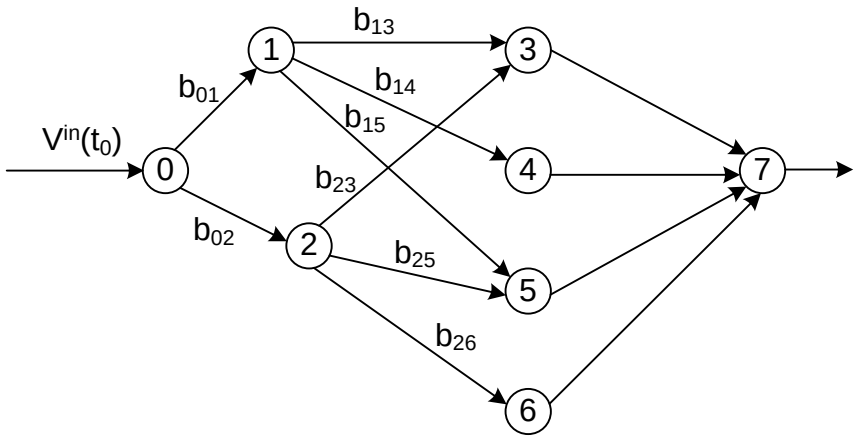


Рисунок 25. Граф технологической сети, для которой выполняется условие полного балансирования (фрагменты маршрутов в каждый из узлов соединения потоков (вершины 3,5,7) имеют одинаковые длины)

Звеньями соединения потоков являются вершины с номерами 3, 5 и 7 (в соответствующих столбцах матриц число ненулевых элементов больше единицы). Длины фрагментов маршрутов равны

для звена 3: $L[0;3]_1 = L[0;3]_4 = 2$;

для звена 5: $L[0;5]_3 = L[0;5]_5 = 2$;

для звена 7: $L[0;7]_1 = \ldots\ldots = L[0;7]_6 = 3$.

Как видим, для каждого из указанных звеньев длины фрагментов входящих в них маршрутов одинаковы, т.е. условие (38) выполняется. Поэтому при любом значении объема на входе сети и любых значениях элементов матрицы B, удовлетворяющих условиям нормировки, сеть может быть сбалансирована. Примем для примера следующие значения: $V^{in}(t_0) = 10$;

$b_{01} = 0,7;\ b_{02} = 0,3;$

$b_{13} = 0,5;\ b_{14} = 0,3;\ b_{15} = 0,2;$

$b_{23} = 0,1;\ b_{25} = 0,3;\ b_{26} = 0,6.$

При принятых значениях параметров объемы на входах звеньев и назначаемые по условию баланса уровни производительности будут равными

$V_1^{in}(t_1) = V^{in}(t_0)\,(b_{01}) = 10 \times 0,7 = 7;\ p_1 = 7$;

$V_2^{in}(t_1) = V^{in}(t_0)\,(b_{02}) = 10 \times 0{,}3 = 3;\ p_2 = 3;$

$V_3^{in}(t_2) = V^{in}(t_0)\,[(b_{01} \times b_{13}) + (b_{02} \times b_{23})] = 10[\,0{,}7 \times 0{,}5 + 0{,}3 \times 0{,}1] = 3{,}8;$

$p_3 = 3{,}8;$

$V_4^{in}(t_2) = V^{in}(t_0)\,(b_{01} \times b_{14}) = 10 \times 0{,}7 \times\ 0{,}3 = 2{,}1;\ p_4 = 2{,}1;$

$V_5^{in}(t_2) = V^{in}(t_0)\,[(b_{01} \times b_{15}) + (b_{02} \times b_{25})] =$

$= 10[\,0{,}7 \times 0{,}2 + 0{,}3 \times 0{,}3] = 2{,}3;\ p_5 = 2{,}3;$

$V_6^{in}(t_2) = V^{in}(t_0)\,(b_{02} \times b_{26}) = 10 \times 0{,}3 \times 0{,}6 = 1{,}8;\ p_6 = 1{,}8;$

$V_7^{in}(t_3) = V_3^{out}(t_3) + V_4^{out}(t_3) + V_5^{out}(t_3) + V_6^{out}(t_3) = 3{,}8 + 2{,}1 + 2{,}3 + 1{,}8 = 10;$

$p_7 = 10.$

Расчеты с применением алгоритма, моделирующего прохождение через сеть партии продукта объемом $V^{in}(t_0) = 10$ *ед*., показали, что установленные уровни производительности звеньев обеспечивают нулевые простои оборудования и нулевые величины запасов в накопителях машин. Баланс не нарушается и при поступлении на вход сети серии партий в последовательные такты на интервале планирования.

Подчеркнем, что условие достижимости баланса (38) является необходимым. Если оно нарушено в каком-либо звене, то сбалансировать его, в общем случае, невозможно. Действительно, если на вход звена от разных других звеньев сети партии продуктов приходят в различных тактах, и их объемы различаются между собой, то не ясно, каким должен быть уровень производительности данного звена.

Рассмотрим процессы в сети из предыдущего примера, добавив в графе две дуги *(0→5)* и *(0→7)* и несколько изменив для сохранения нормировки распределение выходного потока звена *0*.

В сети появились два новых маршрута (7): <0,5,7> и (8): <0,7>.

Новое распределение потока $V_{out}(t_1)$ на выходе звена *0* примем следующим:

$b_{01} = 0{,}5;\ b_{02} = 0{,}3;\ b_{05} = 0{,}1;\ b_{07} = 0{,}1.$

Остальные параметры оставим без изменений.

После корректировки уровней производительности машин по результатам моделирования получены следующие значения:

$p_1 = 5,0;\ p_2 = 3,0;\ p_3 = 2,8;\ p_4 = 1,5;\ p_5 = 2,3;\ p_6 = 1,8;\ p_7 = 4,1$.

При этих уровнях производительности машин достигаются минимальные суммарные потери в размере 16,2 ед. (простои машин – 8,2; величина запасов – 8). Потери сконцентрированы в звеньях 5 и 7, для которых не выполнено условие (38): для звена 5 имеем $L[0,5]_3 = L[0,5]_5 = 2$, но $L[0,5]_7 = 1$; для звена 7 имеем $L[0;7]_1 = \ldots\ldots = L[0;7]_6 = 3$, но $L[0;7]_7 = 2$ и $L[0;7]_8 = 1$.

Таким образом, при нарушении условия (38) состояние полного сбалансирования сети не достижимо. Состояние условного баланса достигается подбором значений производительности тех звеньев соединения потоков, в которых это нарушение имеет место. Представляется очевидным, что при фиксированных характеристиках потока при уменьшении производительности звена сокращаются его простои, но при этом увеличиваются запасы в накопителе и наоборот. Поэтому при необходимости можно путем регулирования производительности добиться более предпочтительного уровня одного показателя за счет ухудшения другого.

Вычислительные эксперименты с моделью технологических сетей показали, что оценки качества процесса прохождения потоков работ, как правило, существенно зависят от объемов партий, производительности машин и нагрузки на маршруты. Результаты исследования сети, представленной в виде графа на рисунке 26, структура которой не допускает полного балансирования, показали, что звенья, для которых не выполняется условие (38) не могут быть полностью сбалансированы (в данном примере это звенья 5 и 7), и потери из-за образования запасов и/или неполного использования производительности будут иметь ненулевые значения.

При более сложной и разветвленной структуре технологической сети сетевые эффекты несогласованности звеньев по производительности

становятся более заметными, что ведет к снижению общей эффективности сети из-за роста запасов и неиспользуемых резервов производительности звеньев.

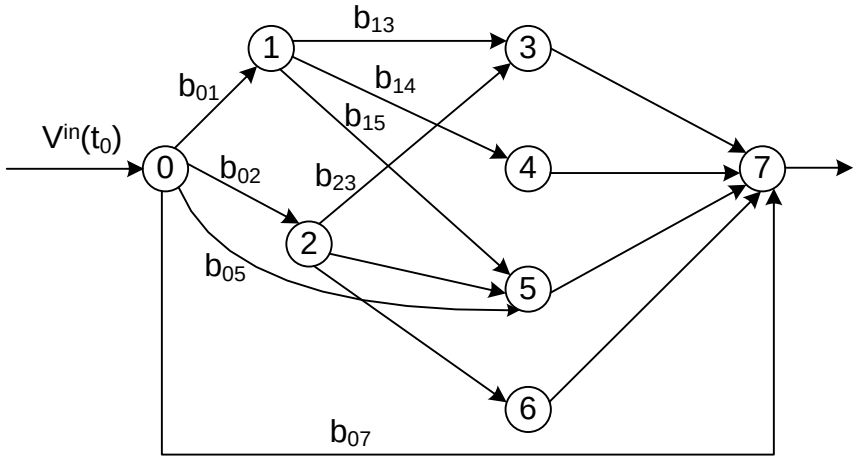


Рисунок 26. Граф технологической сети, для которой не выполняется условие полного балансирования в звеньях 5 и 7

4.3. Модель и метод оптимизации структуры технологической сети

Материал данного параграфа опубликован в совместной статье автора с научным руководителем проф. А.В. Архиповым [68].

В данном разделе рассматривается задача формирования оптимальной по принятым критериям структуры технологической сети. Как уже было ранее отмечено, в производствах дискретного типа нередки случаи, когда производственный процесс или его фрагмент может быть реализован с использованием различных технологических средств. Другими словами, для некоторых изделий, партий сырья, исходных материалов, заготовок и других полупродуктов могут быть использованы различные технологические маршруты. Среди них, как правило, выделяется основной маршрут, остальные (альтернативные) считаются резервными и используются либо в случае сбоев

на основном маршруте, либо для достижения тех или иных оперативных целей [18], [43], [55].

Если технологический план изготовления некоторого изделия включает n последовательно выполняемых операций, и каждая i-я операция может быть реализована s_i способами, то максимально возможное число теоретически допустимых маршрутов N_{max} равно произведению $s_1 \times s_2 \times \ldots \times s_n$ [68]. Схема на рисунке 27, *а* иллюстрирует процедуру формирования множества маршрутов для процесса изготовления некоторого изделия. Процесс включает три операции (обозначены цифрами в кружках 1,2,3), для каждой из которых указаны возможные исполнители. Очевидно, что число возможных маршрутов равно шести. При использовании принятой на схеме нумерации исполнителей эти маршруты суть следующие: (11,21,31), (11,22,31), (12,21,31), (12,22,31), (13,21,31), (13,22,31) (каждый маршрут описан последовательностью номеров машин или иных исполнителей операций, через которые в указанном порядке проходит партия продукта). Выбор одного из маршрутов для производства изделия определяет вариант структуры однопродуктовой сети. Эти варианты представлены своими модельными графами на рисунке 27, *б* [68]. Если в приведенном выше примере возможные исполнители операций 1 и 2 пронумерованы в порядке убывания предпочтительности их использования (убывание предпочтительности исполнителей на рисунке показано вертикальными стрелками), то маршрут м1 может рассматриваться как более предпочтительный, чем, например, маршрут м6. Уровень предпочтительности маршрута можно оценить суммой рангов исполнителей операций. В приведенном примере эти оценки для указанных маршрутов будут равны, соответственно, м1 – 3, м2 – 4, м3 – 4, м4 – 5, м5 –5, м6 – 6. Для сокращения числа просматриваемых вариантов можно вводить в расчет только те из них, которые имеют суммарный ранг не выше заданного. Например, это могут быть маршруты м1, м2 и м3 (их ранги не превышают 4).

Как отмечается автором в статье [68], в случае многомерного потока варианты структур следует рассматривать для каждого из потоков, допускающих альтернативные маршруты. В данном разделе предлагается алгоритм, позволяющий найти рациональный вариант структуры сети, обрабатывающей многопродуктовый поток (см. также статью [68]). При этом возможно использовать многокритериальный подход с введением нескольких локальных критериев оценки вариантов с последующим применением процедур поиска компромиссного решения [38], [53].

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

N – число потоков в составе многопродуктового потока;

$S_{(k)} = \{s_{ki(k)}\}$ – множество альтернативных маршрутов для k-го потока, $k = 1,\ldots,N$; $i(k) = 1,\ldots,n(k)$ ($i(k)$ – индекс маршрута для k-го потока; $n(k)$ – число допустимых маршрутов для k-го потока, $n(k) > 0$);

$C_{(q)}$ – q-й вариант структуры сети, $q = 1,\ldots,q_{max}$ (формально представляет собой q-ю комбинацию из допустимых маршрутов каждого потока $C_{(q)} = \{s_{1i(k)},\ldots,s_{Ni(k)}\}$, $s_{ki} \in S_{(k)}$);

$f(C_{(q)}) = f_q = (f_{q1},\ldots,f_{qK})$ – векторный критерий оценки q-го варианта структуры сети (K – число принятых критериев).

Рассматриваемая задача может быть сформулирована как задача дискретного программирования [42]. В данной работе она решается методом ограниченного перебора вариантов с использованием приемов сокращения числа просматриваемых комбинаций маршрутов.

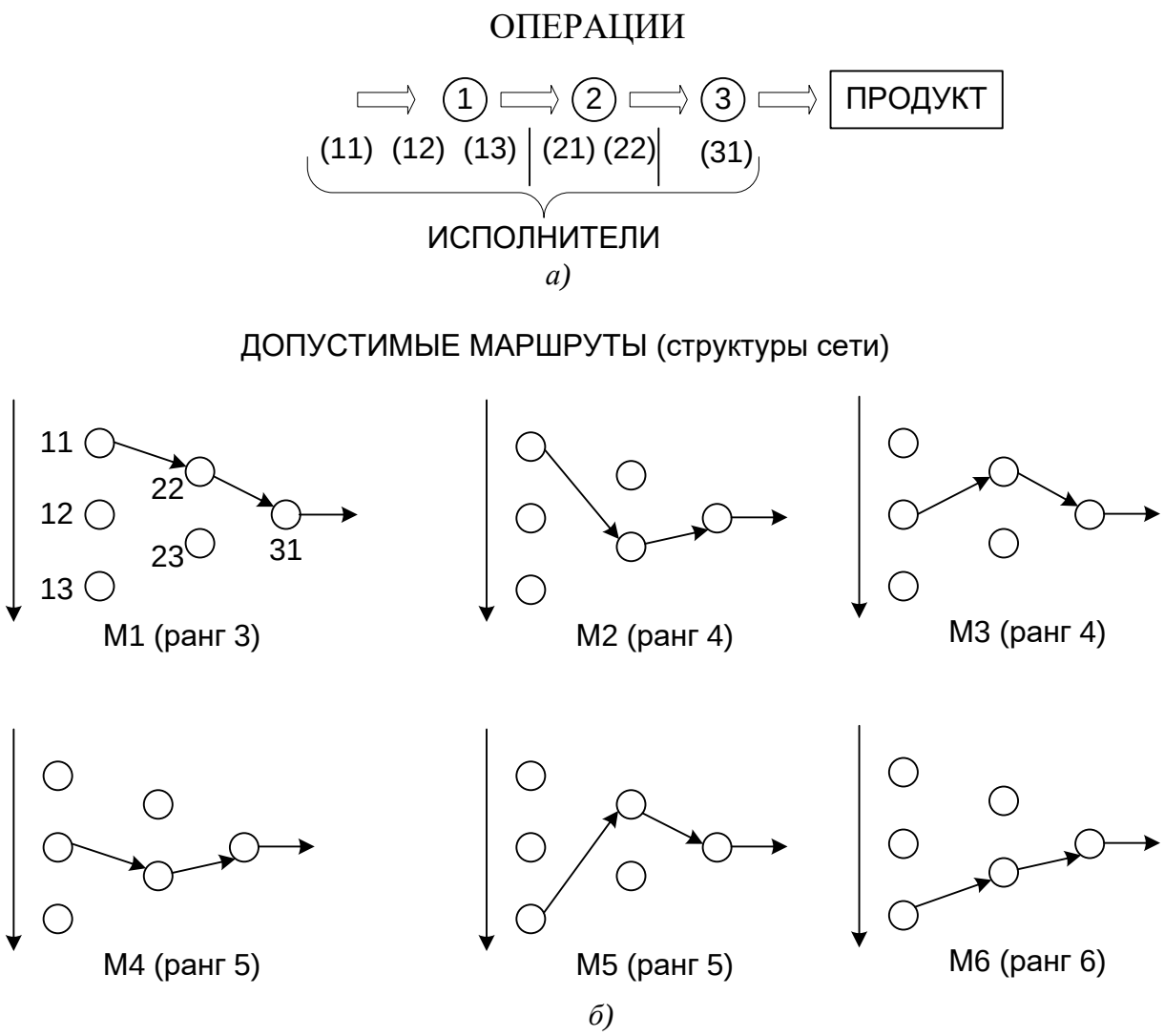


Рисунок 27. Формирование маршрутов производства продуктов при наличии альтернативных исполнителей операций (стрелки слева от схем указывают направление убывания предпочтительности использования исполнителей при выполнении операции)

В укрупненном изложении, представленном также в статье [68], алгоритм включает следующие шаги.

Шаг 1. Генерирование альтернативных маршрутов для каждого из потоков, образующих многопродуктовый поток (формирование множеств $S_{(k)}$).

Шаг 2. Генерирование комбинаций из альтернативных маршрутов для отдельных потоков (формирование множества вариантов структуры сети) Для

каждого из вариантов структуры путем прогона модели движения потоков через сеть (см. описание модели и алгоритма в гл.3, п.3.3) устанавливаются значения принятых локальных критериев ($f_{q1}, \ldots, f_{qK}$). В результате формируется матрица (см. таблицу 7):

Таблица 7. Варианты структуры сети и значения оценивающих критериев

Номер (индекс) варианта, *q*	Состав варианта *(sq1,..,sqK)*	Значение критерия *fq1*	Значение критерия *fq2*	……	Значение критерия *fqK*
1					
……					
qmax					

Шаг 3. Экспертный анализ и отбор по эвристическим соображениям из множества сгенерированных вариантов структуры сети подмножества более предпочтительных вариантов.

Шаг 4. Выбор наиболее предпочтительного варианта структуры сети.

Остановимся подробнее на содержании *шага 3* приведенного выше алгоритма. Отметим, что, общее число q_{max} комбинаций, формируемых из представителей множеств допустимых маршрутов, составленных для каждого из потоков, равно

$$q_{max} = \prod_{k=1}^{K} n(k).$$

Если число комбинаций велико либо ресурсы (например, время, отведенное на решение задачи или имеющиеся вычислительные мощности) ограничены, может быть использован метод сокращенного перебора, дающий экономию ресурсов при поиске, но сопряженный с риском нахождения не самого предпочтительного варианта структуры. Далее предлагается один из возможных приемов сокращения объема перебора [68].

Предположим, что для каждого из продуктовых потоков, обрабатываемых в сети, сформировано множество допустимых маршрутов $S_{(k)}$, $k = 1,\ldots,N$. Предположим также, что маршруты, входящие в каждое из множеств $S_{(k)}$, упорядочены и пронумерованы по убыванию предпочтительности.

Простейшим правилом ранжирования комбинаций маршрутов является учет номеров мест, занимаемых конкретными маршрутами в ранжировках, составленных для каждого из потоков. При таком подходе более предпочтительными логично считать комбинации, имеющие меньшую сумму мест (рангов) входящих в них маршрутов. Значения этого показателя, очевидно, будут находиться в диапазоне от N (число потоков) до величины, равной сумме ($n(1)+n(2)+\ldots+n(N)$). В первом случае комбинация составлена из наиболее предпочтительных вариантов маршрутов отдельных потоков (занимающих в соответствующих ранжировках первые места); во втором случае – из наименее предпочтительных вариантов (занимающих в ранжировках последние места) [68].

Дальнейшему анализу и оценке по принятым критериям следует подвергнуть только комбинации, имеющие ранги, не превышающие значение R, выбранное из указанного диапазона по соображениям экономии ресурсов на поиск приемлемого варианта структуры сети. Такие комбинации названы «рабочими».

Приведем пример. Пусть в технологической сети должны быть обработаны три потока продуктов ($N=3$). Для каждого потока составлены множества допустимых маршрутов $S_{(1)} = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}\}$, $S_{(2)} = \{s_{21}, s_{22}, s_{23}\}$, $S_{(3)} = \{s_{31}, s_{32}\}$. Внутри этих множеств маршруты пронумерованы в порядке убывания предпочтительности их использования. Все возможные комбинации маршрутов и их ранги приведены в таблице 8.

Как видно из приведенных данных, в этом примере по методу полного перебора следует рассмотреть все 18 $(3\times 3\times 2)$ вариантов комбинаций

маршрутов. Ранги этих маршрутов находятся в диапазоне *[3;8]*. В таблице 9 приведены количества комбинаций (вариантов структур сети), которые придется рассмотреть при выборе в качестве пороговых значений суммарного ранга *R* комбинаций различных чисел из диапазона *[3;8]* (для каждого значения порога количество просматриваемых комбинаций определяется как сумма комбинаций, соответствующих всем значениям порога, не превосходящим принятого значения) [68].

Таблица 8. Комбинации маршрутов (варианты структуры сети) и их ранги

Номер комби-нации	Состав комбинации	Ранг комбинации	Номер комби-нации	Состав комбинации	Ранг комбинации
1	s11, s21, s31	3	10	s12, s22, s32	6
2	s11, s21, s32	4	11	s12, s23, s31	6
3	s11, s22, s31	4	12	s12, s23, s32	7
4	s11, s22, s32	5	13	s13, s21, s31	5
5	s11, s23, s31	5	14	s13, s21, s32	6
6	s11, s23, s32	6	15	s13, s22, s31	6
7	s12, s21, s31	4	16	s13, s22, s32	7
8	s12, s21, s32	5	17	s13, s23, s31	7
9	s12, s22, s31	5	18	s13, s23, s32	8

Таблица 9. Объем перебора вариантов структур сети при различных порогах суммарного ранга допустимых комбинаций

Порог суммарного ранга, *R*	Объем перебора	Порог суммарного ранга, *R*	Объем перебора	Порог суммарного ранга, *R*	Объем перебора
3	1	5	9	7	17
4	4	6	14	8	18

В наиболее вероятном случае, когда для каждого потока указаны два допустимых маршрута (основной и резервный), предлагается метод формирования и анализа вариантов маршрутов обработки партий продуктов, основанный на введении двоичных кодов маршрутов и использовании

понятия расстояния Хемминга [98]. Описание метода с примерами применения приведено в статье автора [68].

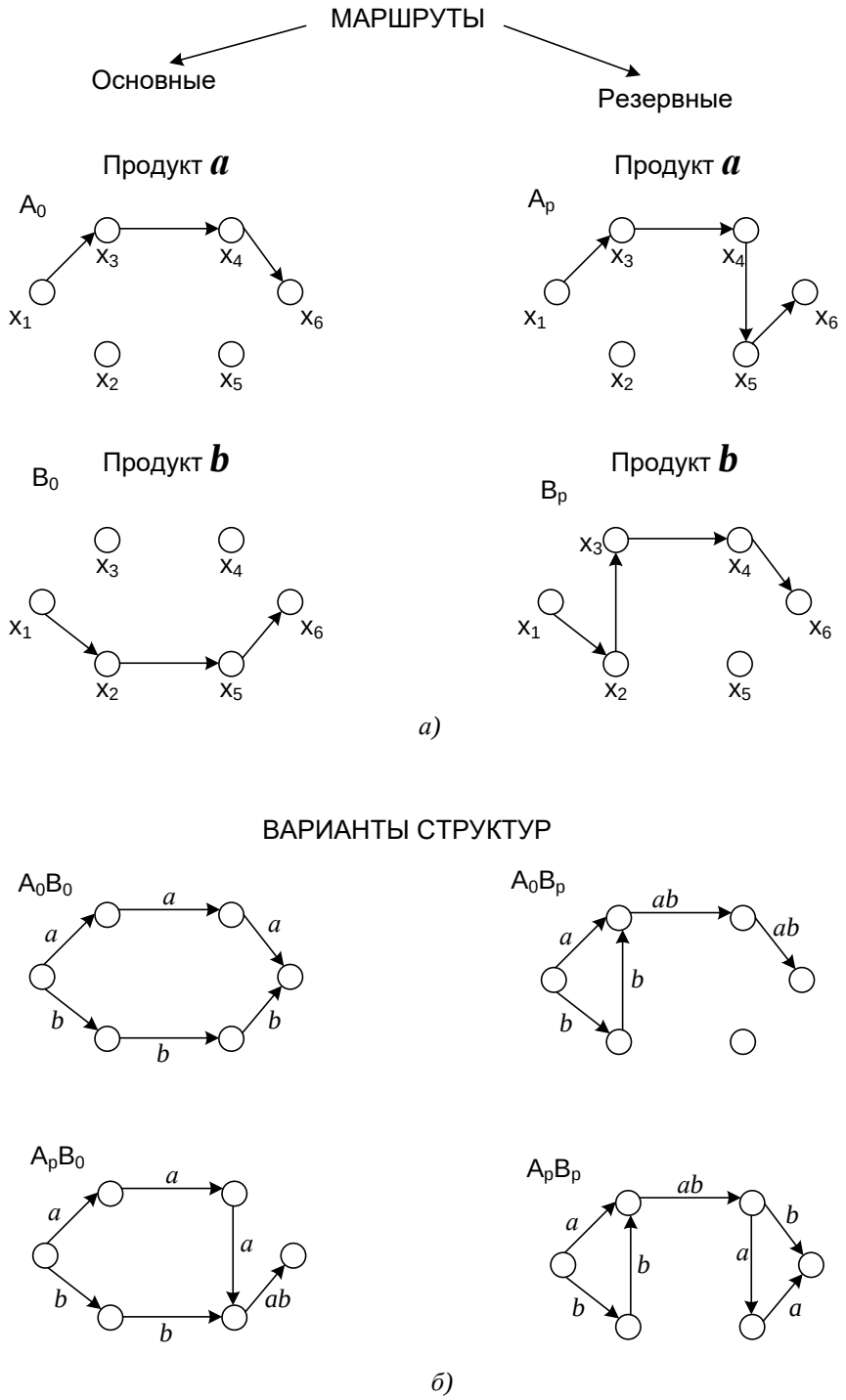


Рисунок 28. Маршруты для продуктов *a* и *b* (а) и возможные варианты структур технологической сети (б)

4.4 Пример применения процедуры адаптации технологической сети в условиях цеха механообработки

Рассмотренные в данной главе процедуры коррекции производительности машин сети и ее структуры, составляющие методику адаптации сети с целью повышения эффективности ее функционирования, были применены для поиска режимов работы механообрабатывающего цеха в составе производственного центра СПб ГБПОУ «Академия машиностроения имени Ж. Я. Котина». Цех выполняет работы по изготовлению партий металлических изделий различного вида по договорам с машиностроительными предприятиями. Производство может быть отнесено к мелкосерийному типу, объемы партий изменяются в широких пределах, номенклатура изделий разнообразна, что определяет большое количество маршрутов обработки. Структура цеха и возможные направления перемещения заготовок и полуфабрикатов показаны на рисунке 29.

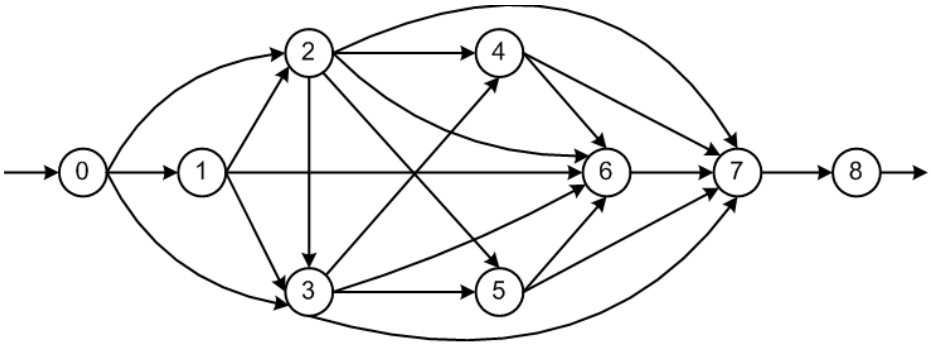


Рисунок 29 – Граф технологической сети цеха механообработки

0 – склад материалов; 1– Заготовительный участок; 2–Токарный участок; 3 – Фрезерный участок; 4 – Участок токарных станков с ЧПУ; 5 – Участок фрезерных станков с ЧПУ; 6 – Участок электроэрозионной обработки; 7 – Контрольно-измерительный участок; 8 – Склад готовой продукции

Некоторые машины являются взаимозаменяемыми и могут работать в режимах с различной производительностью, что с учетом возможного варьирования маршрутов обработки позволяет формулировать задачи системной оптимизации технологической сети по предварительно введенным критериям. Алгоритм адаптации, включающий процедуры моделирования движения многомерных потоков через сеть, процедуры коррекции производительности машин, структуры сети и управления процессом, реализованы в виде разработанной автором компьютерной программы на языке JAVA с применением открытых программных библиотек JDK 21 (имеется свидетельство о государственной регистрации программы, см. Приложение 5).

Для примера рассмотрены процессы производства двух изделий, условно обозначенных A1 и A2. Изготовление каждого из изделий предполагает выполнение определенных операций, условно обозначенных номерами «1-1», «2-1», …и т.д. Используемое оборудование с указанием специализации машин и возможных уровней их производительности на различных операциях представлено в таблице 10. Варианты возможного назначения машин для выполнения технологических операций представлены в таблице 11.

Таблица 10. Оборудование, используемое для производства изделий A1 и A2

Код	Тип	Наименование	Значения производительности по операциям, [шт/такт]
11	СРЗ 200-01Н	Ленточно-пильный отрезной станок	Операция 1-1: 82 Операция 2-1: 91
12	Zirtec	Отрезной станок	Операция 1-1: 61 Операция 3-1: 70
21	СТ16К25Б1000	Токарно-винторезный станок	Операция 1-2: 27
22	СТ16К25Б1000	Токарно-винторезный станок	Операция 1-2: 27
23	СТ16К25Б1000	Токарно-винторезный станок	Операция 1-2: 27

31	6Л82Ш	Фрезерный консольный станок	Операция 2-2: 90
32	ZX7550CW	Сверлильно-Фрезерный станок	Операция 2-2: 50
41	UL-15	Токарный станок с ЧПУ	Операция 1-3: 2, 3, 4
42	SMART42T8	Токарный автомат продольного точения	Операция 1-2: 26, 42 Операция 1-3: 1, 2
43	ET45MY	Токарный обрабатывающий центр	Операция 1-3: 3, 4, 5 Операция 3-2: 20, 26
44	TTB20AMYW	Токарный обрабатывающий центр	Операция 1-3: 3, 4, 5 Операция 3-2: 25, 32
51	UM-50	Фрезерный станок с ЧПУ	Операция 2-3: 2, 3, 4
52	TLV-1000	Фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ	Операция 2-3: 3, 4, 5
61	ACURA 65	Многоосевой обрабатывающий центр с ЧПУ	Операция 2-3: 4, 5, 6 Операция 2-4: 19, 25, 31, 42
71	Контрольная плита	Специально оборудование рабочее место контроллера ОТК	Операция 1-4: 80 Операция 4-1: 76

Таблица 11. Варианты закрепления машин за технологическими операциями

Код/Наименование операции	Варианты используемого оборудования (с указанием кодов машин)
Изделие А1	
1-1-операция: заготовительная	11-СРЗ 200-01Н, 12-Zirtec
1-2-операция: токарная 1	21-СТ16К25Б1000, 22-СТ16К25Б1000, 23-СТ16К25Б1000, 42 SMART42T8
1-3-операция: токарная 2	41-UL-15, 42-SMART42T8, 43-ET45MY, 44-TTB20AMYW
1-4-операция: контрольная	71-Контрольная плита
Изделие А2	
2-1-операция: заготовительная	11-СРЗ 200-01Н
2-2-операция: фрезерная 1	31-6Л82Ш, 32-ZX7550CW
2-3-операция: фрезерная 2	51-UM-50, 52-TLV-1000, 61-ACURA 65
2-4-операция: многоосевая	61-ACURA 65
3-1-операция: заготовительная	12-Zirtec
3-2-операция: токарная	43-ET45MY, 44-TTB20AMYW
4-1-операция: сборочно-контрольная	71-Контрольная плита

Кроме сведений об оборудовании и технологических операциях в исходных данных указываются диапазоны и «шаг» изменения объемов производства каждого из изделий. Также указываются удельные (за один такт, принятый равным 4 часа) величины экономических потерь трех видов:

- затраты на функционирование каждой машины в каждом из возможных режимов по производительности (Zrab), [*усл.ден.единиц*];
- потери, связанные с простоями машин (Zpros), [*усл.ден.единиц*];
- затраты, связанные с образованием запасов продуктов в накопителях машин (Zdop). [*усл.ден.единиц*].

В качестве системного критерия оптимальности используется величина суммарных потерь трех указанных видов, вычисленная по всем машинам сети и отнесенная к установленной с помощью моделирования оценке производительности сети.

Начальные значения производительности каждой машины в соответствии с принятой практикой планирования производства устанавливаются по критерию минимума затрат на функционирование данной машины. В последующем, в процессе параметрической адаптации эти значения корректируются так, чтобы обеспечить минимальное значение системного критерия. В результате выполнения этапа параметрической адаптации для скорректированных уровней производительности рассчитываются оптимальные объемы партий продуктов каждого вида.

На следующем этапе выполняется процедура структурной адаптации. При найденных на предыдущем этапе значениях производительности машин с использованием возможной замены используемого оборудования для выполнения различных операций формируются варианты структур сети. Для каждого варианта рассчитывается значение системного критерия. Процесс останавливается, когда найдено минимальное (или приемлемое) значение суммарных потерь. Процесс адаптации сети заканчивается. В результате установлены следующие величины: оптимальные объемы производства

изделий каждого вида; уровни производительности каждой машины; определена структура сети в виде указания для каждой операции используемого оборудования.

В примере использованы следующие численные данные, сведенные в таблицу 12. В последнем столбце таблицы приведены принятые в расчетах коэффициенты (Кпроизвод) снижения норм производительности машин по различным причинам (состояние оборудования, неплановые перерывы в работе, смена оснастки и др.). Также указаны для изделий диапазон возможного количества и типовой объем партий:

- для изделия А1: (1; 50) [*партий*], 1 [*шт*];

- для изделия А2: (1; 100) [*партий*], 2 [*шт*].

Расчеты проведены с помощью разработанных автором компьютерных программ. Итоги расчетов по программам параметрической и структурной адаптации сети сведены в таблицу 13. Показатели, рассчитанные в результате работы программ, имеют следующие размерности:

- объем продуктов – [*штук*];

- производительность – [*штук/такт*] (такт принят равным 4 часа);

- затраты (все виды частных и общие затраты) – [*усл. ден. ед*.].

Таблица 12. Исходные данные для расчетов

Номер	Наименование	Zrab	Zpros	Zdop	K производ
11	СРЗ 200-01Н	60.0	48.0	22.0	0.93
12	Zirtec	83.0	65.0	35.0	0.8
21	СТ16К25Б1000	95.0	76.0	43.0	0.82
22	СТ16К25Б1000	95.0	76.0	43.0	0.88
23	СТ16К25Б1000	95.0	76.0	43.0	0.79
31	6Л82Ш	110.0	52.0	42.0	0.88
32	ZX7550CW	91.0	50.0	25.0	0.76
41	UL-15	120.0	96.0	42.0	0.83
42	SMART42T8	117.0	93.0	46.0	0.79
43	ET45MY	119.0	96.0	41.0	0.94
44	TTB20AMYW	151.0	102.0	65.0	0.99
51	UM-50	117.0	94.0	43.0	0.81
52	TLV-1000	161.0	98.0	34.0	1.0
61	ACURA 65	143.0	114.0	74.0	0.95

71	Контрольная плита	42.0	17.0	25.0	1.0

Таблица 13. Результаты параметрической и структурной адаптации сети

Режим	Значения частных показателей и системного критерия
Исходный режим	количество тактов: 6 , Объем продуктов: 22 , Производительность: 3,7 Затраты: работа 1339, простой 1253, запасы 49. Суммарные затраты 2641 Общие затраты на ед. производительности: 714
Параметрическая адаптация 1	количество тактов: 6 , Объем продуктов: 47 , Производительность: 7,8 Затраты: работа 3024, простой 951, запасы 130 суммарные затраты 4105 Общие затраты на ед. производительности: 526
Структурная адаптация 1	количество тактов: 6 , Объем продуктов: 47 , Производительность: 7,8 Затраты: работа 2622, простой 977, запасы 140, суммарные затраты 3739 Общие затраты на ед. производительности: 479
Параметрическая адаптация 2	количество тактов: 5 , Объем продуктов: 27 , Производительность: 5,4 Затраты: работа 1519, простой 1034, запасы 0,00, суммарные затраты 2553 Общие затраты на ед. производительности: 473
Структурная адаптация 2	количество тактов: 6 , Объем продуктов: 27 , Производительность: 4,5 Затраты: работа 1405, простой 672, запасы 39, суммарные затраты 2116 Общие затраты на ед. производительности: 470
Итоговое относительное сокращение суммарных потерь на единицу производительности	(714 – 470) 100% = 34% 714

Как видим, в рассмотренном примере сокращение удельных (за такт) суммарных потерь достигло весьма заметной величины (34%).

Как показал опыт расчетов для задач увеличенной размерности (увеличенное число машин и видов изделий, одновременно находящихся в производстве), относительное сокращение суммарных потерь изменяется в зависимости от разнообразия маршрутов, различий в уровнях производительности и от начальных оценок удельных потерь. Величина сокращения потерь для большей части расчетов находилась в диапазоне от 10

до 35%. В отдельных случаях эффект достигался в результате коррекции только производительности либо только структуры сети.

Выводы по главе 4

1. При решении задач проектирования и управления технологическими сетями предложено использовать понятие «адаптивная технологическая сеть». Этим термином предложено обозначать технологические сети, допускающие изменение своих характеристик с целью повышения эффективности работы. В число варьируемых характеристик включаются значения производительности машин, входящих в сеть, и структура организационно-технологических связей между машинами. Определены процедуры параметрической и структурной адаптации сети. Предложена общая схема адаптации сети, отражающая логическую последовательность выполнения процедур параметрической и структурной адаптации.

2. Предложен метод и алгоритм параметрической адаптации технологической сети. Суть алгоритма заключается в оптимизации значений производительности машин по принятым критериям, в качестве которых, предложено использовать величину локальных и суммарных запасов продуктов в накопителях звеньев сети и уровень использования производственного потенциала машин. Предложены алгоритмы определения значений производительности, обеспечивающие нормативные уровни принятых критериев, в частности, обеспечивающие «идеальную» сопряженность звеньев сети по производительности и, как следствие, нулевые межоперационные запасы в накопителях. Предложена процедура определения по найденным идеальным значениям фактически реализуемых значений, входящих в диапазон, обусловленный техническими ограничениями. Метод иллюстрирован численными примерами.

3. Предложен метод и алгоритм структурной адаптации технологической сети. Метод учитывает, что структура связей между машинами не является жесткой, а устанавливается наложением принятых маршрутов перемещения соответствующих потоков последовательно по тем или иным машинам. Учтено также, что для производства многих изделий могут быть указаны различные варианты маршрутов, в частности, основной и резервный (или несколько резервных). Предложен алгоритм синтеза комбинации маршрутов с использованием многокритериальной модели. Для наиболее распространенного случая двух маршрутов (основного и резервного) предложен интерактивный алгоритм, основанный на двоичном кодировании комбинаций и их сравнении по расстоянию Хемминга. Метод иллюстрирован численными примерами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ технологических ресурсов предприятий и предложен подход к их структуризации. Выделен класс многомашинных систем, в которых организационно-технологические связи между технологическими установками образуют сетевую структуру. Для обозначения этого класса систем предложено использовать термин «технологические сети». Указаны особенности технологических сетей как объектов моделирования. Сформулирована задача оценки производительности технологических сетей.

2. Разработан комплекс функциональных и структурных моделей, описывающих процессы производства в технологической сети, включающий в свой состав модели одно- или многопредметных потоков продуктов, модель технологической установки, выполняющей преобразование входного потока продуктов, отражающая особенности организации функционирования различных видов обрабатывающего оборудования, модель технологической сети в виде ориентированного графа, вершинам которого приписаны «веса», равные заданным оценкам производительности технологических установок.

3. Разработан и теоретически обоснован метод оценки предельной производительности технологической сети при обработке однопродуктового потока по величине «максимального потока», определяемой с использованием понятия разреза графа и теоремы Форда-Фалкерсона.

4. Разработаны методы, алгоритмы и программы оценки производительности технологической сети на стадии планирования и организации производства, использующие процедуру компьютерного моделирования движения через сеть по различным маршрутам входных одно- и многопродуктовых потоков. В результате расчетов устанавливаются объем продуктов на выходе сети, объемы запасов, аккумулируемых в накопителях

звеньев, резервы производительности звеньев, не использованные при выполнении работ.

5. Предложено ввести в научный оборот понятие и термин «адаптивные технологические сети», определяющим и отличительным свойством которых предложено считать возможность изменения (с учетом известных ограничений) таких характеристик, как производительность звеньев (технологических установок) и маршруты обработки изделий в технологической сети для ее адаптации к характеристикам входных потоков работ и на этой основе повышения эффективности производства.

6. Разработаны модели, методы, алгоритмы и компьютерные программы для задач параметрической и структурной адаптации технологической сети с использованием для коррекции уровней производительности машин и выбора маршрутов движения потоков процедур, обеспечивающих при их согласованной работе в циклическом режиме реализацию принципов адаптивности и системной оптимизации производственного процесса.

7. Проведены расчеты с использованием предложенных моделей, методов и программ в условиях цеха механообработки производственного центра СПб ГБПОУ «Академия машиностроения имени Ж.Я. Котина». Выявлены резервы сокращения удельных суммарных затрат на функционирование сети на 10-35% (в зависимости от состава производственных заданий) за счет выбора рациональных уровней производительности машин и оптимального проектирования структуры сети. Результаты диссертации также приняты к использованию на предприятиях ООО «Мехпромпроцесс», ООО «Северный технопарк», ООО «НПК «Антей», ООО «МКОД».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 70990-2023 Цифровая промышленность. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2023г. № 1448-ст : дата введения 2024-02-01 / разработан Ассоциацией «Цифровыве инновации в машиностроении» (АЦИМ). – Москва : Стандартинформ, 2024. 1-5с. - Текст : непосредственный.

2. ГОСТ Р МЭК 61512-1-2016 Управление серийным производством. Модели и терминологии = Serial production management. Models and terminology : национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2016 г. №1334-ст. : введен впервые : дата введения 2020-08-03 / подготовлен ООО «НИИ экономики связи и информатики «Интерэкомс» (ООО «НИИ «Интерэкомс»). – Москва : Стандартинформ, 2020. 8-12с. - Текст : непосредственный.

3. Проектирование систем автоматизации технологических процессов в красильно-отделочном производстве / В. А. Климов, М. М. Телемтаев, А. В. Архипов и др. – М.: Легпромбытиздат. – 1989. – 274 с.

4. Ананичев, Д.А. Анализ эффективности комплекса «работы/ресурсы» в системе производственного менеджмента предприятия / Д. А. Ананичев – Текст : электронный // Международная научная-практическая конференция. – 2015. - №2. - (Актуальные вопросы экономики и современного менеджмента). – С.193 – 194. – URL: https://izron.ru/articles/aktualnye-voprosy-ekonomiki-i-sovremennogo-menedzhmenta-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezhdunar/sektsiya-13-operatsionnyy-menedzhment/analiz-effektivnosti-

kompleksa-raboty-resursy-v-sisteme-proizvodstvennogo-menedzhmenta-predpriyatiya (дата обращения: 04.01.2023).

5.Ананичев, Д. А. Оценка эффективности использования технологических ресурсов при календарном планировании работ / Д. А. Ананичев, А.В.Архипов // Вестник Санкт - Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2015. – №1. – С.3–8.

6. Ананичев, Д.А. Оценка соответствия технологических ресурсов предприятия требованиям производственного планирования / Д.А.Ананичев – Текст : электронный // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2015. – Т.29. – №3. – С.5–7. – URL: https://tlp.spb.ru/ru/archive/issue-3-2015 (дата обращения: 04.01.2023).

7. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций / А. В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. - Москва : ЛЕНАНД, 2015. – 306 с. – Текст : непосредственный.

8. Артюхов А.В. Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления : спец. 05.02.22 «Организация производства (машиностроение) : дис ... канд. техн. наук. / Артюхов Александр Викторович. - Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева. – Самара. – 2017.

9.Архипов, А.В. Факторы и критерии гибкости производственных систем / А.В. Архипов, Ю.В. Пархоменко // Вестник Санкт - Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2010. – № 2. – С.8–15.

10. Архипов А. В. Эвристические методы в управлении производством: на материале текстильной и легкой промышленности / А. В. Архипов // Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 163 с.

11. Архипов, А.В. Гибкие организационно-технологические комплексы в швейном производстве / А.В. Архипов, О. А. Мишенин, Ю. В. Пархоменко // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2010. – Т. 8. – № 2. – С. 87–91.

12. Архипов, А.В., Инновационное развитие предприятия: цели, критерии, особенности планирования /А.В. Архипов, Н.В. Пишко // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2012. - №1. - С. 79-83.

13. Архипов, А.В., Формирование и оценка устойчивости производственных сетей в системе субконтрактинга / А.В. Архипов, В.Е. Толкачева // Индустрия. – 2006. – №5(47) – с. 20-23.

14. Архипова, Т.Н. Взаимное влияние и развитие технологии и менеджмента на малых швейных предприятиях / Т. Н. Архипова, В.А. Сучилин. – Текст : непосредственный // Швейная промышленность. – 2015. – №1-2, С. 38–41. – ISSN 0132-0955.

15. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати – М.: Наука, 1974. - Текст : непосредственный.

16. Богданов, А.И., Нелинейные математические модели оптимизации плана производства предприятий легкой промышленности / А.И.Богданов, Б.С.Монгуш // Наука и бизнес: пути развития. − 2020. − №4 (106). – С. 18-24.

17. Бусыгина, Н.А. Автоматизация производственного планирования швейного предприятия с помощью систем имитационного моделирования / Н. А. Бусыгина, Д. А. Васильев, Н. А. Корнилова. – Текст – непосредственный // Швейная промышленность. – 2015. – № 1/2. – С.32–33. - ISSN 0132-0955.

18. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II / Д. А. Гаврилов. – СПб.: Питер. – 2003. – 352 с. – Текст : непосредственный.

19. Галимов, Д. Производственные мощности обрабатывающей промышленности России: важнейшие тенденции и структурные характеристики / Д. Галимов и др. // Вопросы экономики. − 2017. − №5. − С.60 -72.

20. Головко О.И. Инновационно-ориентированные бизнес-модели в системе управления развитием предприятий : спец. 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : дисс… канд. экон. наук. / Головко Ольга Игоревна. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет. 2016. – 183 с.

21. Губанов, С.С. Неоиндустриальный мейнстрим: ЮНИДО и Россия / С.С.Губанов // Экономист, 2021. - №1. - С. 3-14.

22. Отчет ЮНИДО. Индустриализация в цифровую эпоху // Экономист, 2021. - №1. - С. 15-42.

23. Губанов, С. Россия и США: соотношение производительности труда / С.С. Губанов // Экономист, 2022. - №9. - С.19-21.

24. Дасковский, В. О реанимации категории амортизации в экономике / В. Дасковский, В. Киселев // Экономист, 2019, №6, С. 34–53.

25. Дасковский, В. Конкурентоспособность в системе экономических категорий / В. Дасковский, В. Киселев // Экономист, 2020. - №6. - С. - 3–22.

26. Дасковский, В. Выход из тупика – разработка и реализация программы инновационной реконструкции предприятий / В. Дасковский, В. Киселев // Экономист, 2020. - №4. - С. 3–23.

27. Дасковский, В. Управление хозяйственной деятельностью и развитие предприятия / В. Дасковский, В. Киселев // Экономист, 2020. - №2. - С. 42–60.

28. Дмитриев, А. Инновации как фактор повышения конкурентоспособности на мировом рынке / А. Дмитриев, А.Кадымова // Экономист, 2020. - №6. - С. 23–27.

29. Дементьев, С.А. Модули гибких производственных систем и автоматизированное оборудование швейных предприятий / С.А.Дементьев, Л.М.Сафонов. – М.: Легпромбытиздат, 1993. − 385 с.

30. Доржиева, В. Подходы к формированию стратегических научно-технологических приоритетов новой промышленной политики / В. Доржиева // Экономист, 2019. - №4. - С.52-56.

31. Жариков, В. Роль и место машиностроения в инновационной экономике / В.Жариков, М.Ершова // Экономист, 2017. - №12. - С.41-50.

32. Жаров, М.В. Имитационное моделирование производственной среды цехов механической обработки / М.В.Жаров // Автоматизация в промышленности. – 2020. – №5. − С. 34-37.

33. Зыков, А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. − М.: Вузовская книга. – 2014. – 264 с.

34. Ицкович, Э.Л. Термины автоматизации и цифровизации предприятий технологических отраслей: их пояснение, содержание и практическое значение / Э.Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2020. − №4. – С. 3-11.

35. Кайгородцев, А. Развитие промышленного производства как фактор обеспечения экономической безопасности России / А. Кайгородцев // Экономист, 2020. - №3. - С.36-41.

36. Каляшина, А.В. Общие подходы к оценке эффективности промышленного оборудования / А.В. Каляшина // Фундаментальные исследования. – 2016. − № 2-5.− С. 980-984.

37. Карпунина, Е. Парадигма устойчивого развития в цифровой экономике / Е. Карпунина // Экономист, 2020, №2, С.25-34.

38. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Х. Райфа, Р.Л. Кини; пер с англ. : Под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь. − 1981. – 560 с.

39. Кокарева В.В. Методы имитационного моделирования организации аддитивных технологических процессов в мелкосерийном производстве : спец. 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : дисс ... канд. техн. наук. / Кокарева Виктория Валерьевна. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева. – 2019.

40. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний / Л. В. Миллер, В. Л. Максвелл, Р. В. Конвей. – М.: «Наука», 1975. – 360 с.

41. Кораблев, И.Г. Оценка уровня автоматизации производственных систем / И.Г.Кораблев, И.С.Решетников // Автоматизация в промышленности. – 2020. – №1. – С. 38-42.

42. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Приближенные методы дискретного программирования // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983. – №1. – С.165-176.

43. Коренная К.А., Логиновский О.В., Максимов А.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: монография / А.А. Максимов, О.В. Логиновский, К.А. Коренная. - под ред. А.Л. Шестакова; ЮУрГУ. – Челябинск, 2012. – 315 с. – Текст : непосредственный.

44. Корнев, А. О восстановлении приоритета развития обрабатывающей промышленности / А. Корнев // Экономист, 2020. - №3. - С.24-35.

45. Кохно, П. О производительности труда высокотехнологичных промышленных предприятий / П.Кохно, А. Кохно // Экономист, 2020. - №2. - С.35-41.

46. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер. с англ. − М. : Мир, 1978. – 432 с.

47. Курбанов, Т. Россия на пути прорыва в новый технологический уклад: экономические и финансовые аспекты / Т. Курбанов // Экономист, 2019. - №3. - С. 3-12.

48. Лазариди, С.К. Потенциалы элементов, внутренняя сбалансированность и организационная эффективность производственных

систем / А.В. Архипов, С.К. Лазариди // Известия Высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - №3. 2011. - С. 123-128.

49. Монастырская, М.В. Критерии сбалансированности режимов функционирования звеньев производственной системы / А.В. Архипов, М.Н. Монастырская // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. - № 2 (17). - 2009. - С.10-16.

50. Москвин, В. На пути к созданию производств VI-го технологического уклада / В. Москвин // Инвестиции в России, 2012. - №5. - С.36.

51. Нам нужно современное отечественное оборудование // Экономист, 2022. - №10.- С. 3-25.

52. Никитина, Л.Н. Разработка механизма принятия оптимальных управленческих решений для обеспечения экономической стабильности предприятий легкой промышленности / Никитина Л.Н., Куликова О.Н., Тропынина Н.Е. // Вестник СПГУПТД. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. − 2019. − № 2. – С. 3 – 8.

53. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М. : Физматлит. − 2005. − 287 с.

54. Общая эффективность оборудования / Пер. с англ. − М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2007. − 120 с.

55. О'Лири, Д. ERP-системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия. Выбор, внедрение, эксплуатация / Дениел О'Лири; [пер. с англ. Ю.И.Водяновой] – М.: ООО «Вершина». – 2004. – 272 с.

56. Пархоменко, Ю.В. Оценка гибкости организационно-технологических комплексов промышленных предприятий / Ю.В. Пархоменко // Аграрный вестник Урала, №1(80), 2011, С.36-38.

57. Пархоменко Ю.В. Развитие инструментов производственного планирования деятельности предприятий в условиях нестабильного ассортимента и применения гибких организационно-технологических

комплексов : спец. 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : дисс…канд. экон. наук. / Пархоменко Юлия Викторовна. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна. 2011. – 178 с.

58. Первозванский, А.А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М.: Наука, 1975. – 616 с.

59. Пишко Н.В. Инструменты планирования инновационно-технологического развития промышленного предприятия : спец. 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : дисс…канд. экон. наук. / Пишко Надежда Вячеславовна. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, 2012.− 200 с.

60. Платонов Д.Е. Оценка производительности технологической сети по величине максимального потока / А.В. Архипов, Д.Е. Платонов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. №4. – С. 72-76. – DOI: 10.46418/2619-0729_2022_4_14.

61. Платонов Д.Е. Оценка производительности технологической сети при обработке однопродуктового потока с использованием компьютерного моделирования / Д.Е. Платонов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2023. №1. – С. 46-51. - DOI: 10.46418/2619-0729_2023_1_9.

62. Платонов Д.Е. Структуры и оценки производительности технологических объектов / Д.Е. Платонов // Высшая школа: научные исследования. Материалы Межвузовского международного конгресса / Издательство Инфинити. - Москва, 2022. – Вып. 42. – С. 179-185.

63. Платонов Д.Е. Модель преобразования потока работ в обрабатывающих звеньях технологических сетей / Д.Е. Платонов // Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития / Сборник научных статей по

материалам X Международной научно-практической конференции. Ч.1 / Издательство НИЦ Вестник науки. – Уфа, 2022. – Номер: МНК-338. – С. 59-68.

64. Платонов Д.Е. Потоки работ и структуры технологических комплексов в производствах дискретного и непрерывно - дискретного типов / Д.Е. Платонов // Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития / Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. Ч.1 / Издательство НИЦ Вестник науки. – Уфа, 2022. – Номер: МНК-338. – С. 69-77.

65. Платонов Д.Е. Анализ сбалансированности объемов работ и ресурсов в технологических сетях / Д.Е. Платонов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12. Тула. Издательство ТулГУ. - 2023. – С.323–326. - DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-352-353.

66. Платонов Д.Е. Резервы повышения производительности технологических сетей/ Д.Е. Платонов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12. Тула. Издательство ТулГУ. - 2023. – С.352–355. - DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-323-324.

67. Платонов Д.Е. Развитие концепции адаптивных технологических сетей и задачи системной оптимизации их параметров // Платонов Д.Е., Архипов А.В. Технические науки: проблемы и решения. Сб. ст. по материалам LXXIV-LXXV межд. науч.- практ. конф. – №7-8 (69). – М., Изд. «Интернаука», 2023. – С.46 – 55.

68. Платонов Д.Е. Выбор рациональных маршрутов потоков продуктов в технологической сети // Платонов Д.Е., Архипов А.В. Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований / Сб. ст. по материалам LXVI междунар. науч.- практ. конф. – № 8 (57). Новосибирск: Изд. ООО «СибАК», 2023. – С.34 – 42.

69. Производительность труда в мире, 2020-2021 г. // Экономист, 2020, №12, С.88-89.

70. Рейнгольд Э., Нивергельд Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. Пер. с англ. − М.: Мир, 1980. − 476 с.

71. Робототехнические системы в текстильной и легкой промышленности / под ред. В. А. Климова. − М.: Легпромбытиздат,1993. − 324 с.

72. Рубцов Н.М. Исследование и разработка методов измерения, анализа и управления производственным потенциалом на текстильных предприятиях : спец. 08.00.28 «Организация производства» : дисс...канд. техн. наук. / Рубцов Николай Михайлович. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна. – 1997. – 188 с.

73. Рязанов, В. От аналоговой к цифровой экономике: технологический детерминизм и экономическое развитие / В. Рязанов // Экономист, 2019. - №6. - С. 3–24.

74. Сиротина Л.К. Разработка методологии оперативно-производственного позаказного планирования в условиях организационной предметно-технологической фрагментации и промышленных экосистем : спец. 05.02.22 «Организация производства (текстильная и легкая промышленность)» : дисс...докт. техн. наук. / Сиротина Лидия Константиновна. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – 2022. – 302 с.

75. Сошников, А. В. Формирование рациональных календарных планов работ с учетом нескольких критериев // А.В. Архипов, А.В. Сошников / Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2020. − № 1. – С. 24–31.

76. Сухарев, О.С. Новая индустриализация и модели технологического развития / О.С. Сухарев // Экономист, 2020. - №4. - С. 38-55.

77. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсевич В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы / В.А. Струсевич, Ю.Н. Сотсков, В.С. Танаев. - М. : Наука, 1989. – Текст : непосредственный.

78. Танаев В.С., Ковалёв М.Я., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Групповые технологии / В.С. Танаев, М.Я. Ковалёв. – Минск : Институт технической кибернетики, 1998. – Текст : непосредственный.

79. Титова, М.Н. Сценарное моделирование и оптимизация пропорций параметров сопряженного производства химических волокон и текстильных изделий в условиях вторичной переработки сырья / М.Н.Титова, Л.К.Сиротина // Химические волокна. – 2021. – №3. – С.45–49.

80. Фелимонова, Н.М. Гибкость предприятия – как фактор эффективности функционирования предприятий / Фелимонова Н.М., Гаврилин Е.В., Петрова А.Г. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. - №2 (374).

81. Фролов М.А. Методы и модели организационной обоснованности гибких производственных систем с учетом вероятностных факторов : спец. 05.02.22 «Организация производства (машиностроение)» : дисс...канд. техн. наук. / Фролов Михаил Александрович. – Самара. Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева. – 2017.

82. Хачатрян, Н.К. Исследование динамики потока в модели организации грузоперевозок по круговой цепочке станций / Н.К. Хачатрян, Л.А. Бакларян // Экономика и математические методы, 2021. - т.57. - вып. 3. - С.83.

83. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху. – Москва : Мир, 1974. – Текст – непосредственный.

84. Шориков, А.Ф. Методика оптимизации адаптивного управления выпуском продукции предприятия на основе динамической экономико-математической модели / А.Ф. Шориков // Экономика и математические методы. – 2022. - т.58. - вып. 4. - С.102−112.

85. Элдридж, Л. Уточненный метод оценки отработанных часов для измерения производительности /Л. Элдридж, С. Пабилония, Д. Палмер, Р. Стюарт, Д. Варгезе // Экономист, 2022. - №11. - С.31-60.

86. D. Ivanov, B. Sokolov, A. Arkhipov, V. Tolkacheva. Decision making framework under integrated risk modeling in collaborative enterprise network // IFIP International Federation for Information Processing, Volume 224, Network-Centric collaboration and Supporting Frameworks, eds. Camarinha-Matos, L., Afsarmanesh, H., Ollus, M. – Boston: Springer, 2006. – pp. 211-218.

87. Della Croce F., Grosso A., Paschos V. (2004). Lower bounds on the approximation ratios of leading heuristics for the single-machine total tardiness problem // Journal of Scheduling. № 7. P. 85–91.

88. Grigoriadis M.D., White W.W. (1972). A partitioning algorithm for the multicommodity network flow problem, Math. Progr. 3, p.157.

89. Ford L. R., Fulkerson D., R., Maximal flow through a network, Can. J. of Math. 18, / Fulkerson D., R., Ford L. R. Princeton University Press, Princeton, 1956. – (399-404 pages) : : il. – Загл. с титул. – Includes bibliographical references and index. – ISBN 978-0-8176-4841-1. Текст : непосредственный. Перевод заглавия: Максимальный поток в сети. (1956). P. 399.

90. Ford L. R., Fulkerson D. R., Flows in networks, (Research Studies Series) by Ford, Lester Randolph, Fulkerson, D. R. (1962) / Fulkerson D. R., Ford L. R. – Princeton University Press, Princeton, 1962. - (198 pages) : il. – Загл. с титул. – Includes bibliographical references and index. – ISBN 9780691273457. – Текст : непосредственный. Перевод заглавия: Потоки в сетях (серия исследований) Форд, Лестер Рэндольф, Фалкерсон, Д.Р., (1962).

91. Sakarovitch M., The multicommodity maximum flow problem, Report ORC-66-25 [Ph.D. Engineering] / Sakarovitch Michel – California : Operations research Centre, University of California, Berkeley, 1966.

92. Turban E., Pollard C., Wood G. Information technology for management: advancing sustainable, profitable business growth / Wood G., Pollard C., Turban E.

– Электрон. текстовые дан. A Wiley Brand, 2013. – (480 pages) : il. – Загл. с титул. – Includes bibliographical references and index. – ISBN 1118453247. – ISBN 978-1118453247. Б. ц. – Текст : непосредственный. Перевод заглавия: Информационные технологии для управления: содействие устойчивому и прибыльному росту бизнеса. Wile – P. 386.

93. Worley C.G., Williams T.D., Lawler E.E. The Agility Factor: Building Adaptable Organizations for Superior Performance. US: FT Jossey-Bass / Lawler E.E., Williams T.D., Worley C.G. – Электрон. текстовые дан. – A Wiley Brand, 2014. – (202 pages) : il. – Загл. с титул.– Includes bibliographical references and index. – ISBN 1118821378. – ISBN 978-1118821374. Б. ц. – Текст : непосредственный. Перевод заглавия: Фактор гибкости: создание адаптивных организаций для достижения максимальной эффективности. Научно обоснованный подход к достижению долгосрочной прибыльности бизнеса. Wiley – P. 208.

94. ANS/ISA-95.00.01-2000. Enterprise - Control System Integration Part 1: Models and Terminology : [сайт]. 2023. – URL: http://cimosa.de/Standards/ISA950001.html (дата обращения 01.02.2023). – Текст : электронный.

95. First National Consulting Group. Оценка эффективности работы оборудования OEE : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.fnc-group.ru/calculator-oee.html (дата обращения 01.02.2023). – Текст : электронный.

96. Control Engineering. Повышение производительности предприятия : [сайт]. – 2025. – URL: https://controleng.ru/proekty-i-vnedrenija/povyshenie-proizvoditelnosti-predprijatija-kak-izmeri/ (дата обращения 01.02.2023). – Текст : электронный.

97. Ассоциация Деминга. Общая эффективность оборудования : [сайт]. – 2023. – URL: http://www.deming.ru/Books/ObshaEffektObor.htm (дата обращения: 05.02.2023). – Текст : электронный.

98. Файловый архив студентов : [сайт]. – 2023. – URL: https://studfile.net/preview/5308066/page15 (дата обращения: 05.02.2023). – Текст : электронный.

99. Министерство экономического развития Российской Федерации : официальный сайт. – 2023. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda/ (дата обращения: 13.02.2023). – Текст : электронный.

100. Первый бит. Создание имитационных моделей в среде AnyLogic : сайт. – URL: https://1solution.ru/services/imitatsionnoe-modelirovanie (дата обращения: 13.02.2023). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Содержание этапов и пример применения алгоритма коррекции производительности оборудования в сети по методу частичного перебора

Материал данного приложения детализирует укрупненное описание алгоритма коррекции уровней производительности звеньев сети, приведенное в п.4.2 основного текста диссертации. Материал опубликован в совместной статье автора с научным руководителем [67]. Приведен пример применения алгоритма.

Логика алгоритма коррекции производительности по первому из предлагаемых методов представлена в виде блок-схемы на рисунке 23. Алгоритм составлен для случая, когда требуется обеспечить соответствие запасов в накопителях заданным нормативам. Ниже приведено пояснение шагов и действий, выполняемых при коррекции производительности, обозначенных на блок-схеме цифрами.

Шаг 1. Определение для каждого звена диапазона возможного изменения производительности. Определение допустимых уровней показателя

Шаг 2. Анализ возможности проведения коррекции производительности звеньев:

Для каждого звена проверка условия: коррекция возможна? (да, нет)

- если НЕТ (коррекция невозможна), то завершение работы алгоритма (переход к шагу 7);

- если ДА (коррекция возможна), то продолжение анализа (переход к шагу 3).

Шаг 3. Назначение начальных (базовых) уровней производительности звеньев (выбор начального режима работы сети). Назначение нормативов запасов в накопителях звеньев.

Шаг 4. Прогон модели. Определение и фиксация начального (базового) уровня запасов в накопителях.

Шаг 5. Проверка условия: запасы в каждом звене соответствуют нормативам? (да, нет)

- если ДА, то завершение работы алгоритма (переход к шагу 7);

- если НЕТ, то запуск программы коррекции (переход к шагу 6).

Шаг 6. Программа коррекции

(1) Расчет приоритетов всех звеньев сети r_j, $j = 1,\ldots,n$;

(2) Определение состава множества звеньев, для которых будет проведена коррекция (обозначено $N_{кор}$) (это звенья с положительными приоритетами, значения которых удовлетворяют заданным условиям);

(3) Определение для звеньев $j \in N$кор составов множеств повышенных уровней производительности; оценка числа просматриваемых комбинаций g_{max};

(4) Синтез очередного режима работы сети (коррекция производительности звеньев $j \in N$кор (назначение для них новых значений производительности, т.е. выбор нового режима работы сети));

(5) Прогон модели. Определение и фиксация текущего уровня запасов в накопителях.

(6) Проверка условия: запасы в каждом звене соответствуют нормативам? (да, нет)

- если ДА, то завершение работы алгоритма (переход к шагу 7);

- если НЕТ, то (переход к действию (7)).

(7) Проверка условия «все режимы просмотрены?» (да, нет)

- если НЕТ, переход к действию (1);

- если ДА, то формулируется вывод: «при текущих параметрах сети и потоков нормативы не выполнимы». Завершение работы алгоритма (переход к шагу 7);

Шаг 7. Завершение работы алгоритма

Пример. Рассмотрим технологическую сеть, модельный граф которой представлен на рисунке 24. На вход сети поступает однопродуктовый поток, объемом 10 ед. / такт ($V^{in}(t) = 10$). Производительности звеньев могут быть изменены в своих диапазонах дискретно: звено $x_0 : p_0 \in [6,8,10]$; звено $x_1: p_1 \in [5,7,9]$; звено $x_2 : p_2 \in [1,2]$; звено $x_3 : p_3 \in [3,4,5]$; звено $x_4 : p_4 \in [1,2]$; звено $x_5: p_5 \in [3,4,5]$. Требуется установить такие уровни производительности звеньев из указанных для них диапазонов допустимых значений, при которых суммарные запасы в накопителях минимальны.

Общее число возможных сочетаний режимов работы звеньев равно произведению числа градаций в диапазонах: $N = 3 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 324$. Однако, часть вариантов может быть исключена из рассмотрения по различным соображениям. Так, в частности, представляется разумным производительности входного (x_0) и выходного (x_5) звенев принять максимальными (в данном случае они равны объему входного потока). Количество вариантов для просмотра сократится до *36*. Поиск среди этих вариантов наиболее предпочтительного по принятому критерию может быть организован по различным стратегиям. Укажем некоторые из них:

- организация полного перебора и анализа всех вариантов (сочетаний уровней производительности);

- организация процесса генерирования вариантов с оценкой каждого из них по принятому критерию. Остановка процесса при получении варианта с приемлемым значением критерия (или критериев);

- выбор в качестве начального варианта сочетания самых низких уровней производительности с последующим пошаговым их увеличением с учетом динамических (изменяемых на каждом шаге) приоритетов звеньев;

- выбор в качестве начального варианта сочетания самых высоких уровней производительности с последующим пошаговым их уменьшением с учетом динамических приоритетов звеньев.

Рассмотрим для иллюстрации метода последнюю из указанных выше стратегий поиска. Примем в качестве исходных уровней производительности звеньев максимальные значения из диапазонов (*ед./такт*): $p_0 = 10$; $p_1 = 9$;

$p_2 = 2$; $p_3 = 5$; $p_4 = 2$; $p_5 = 10$. Это сочетание уровней производительности пометим номером 1. Применив алгоритм прогона модели движения потока через сеть, получим профиль запасов в накопителях звеньев: $V_0^z = 0$; $V_1^z = 0$;

$V_2^z = 0$; $V_3^z = 4{,}2$; $V_4^z = 0$; $V_5^z = 0$. Объем на выходе сети (это выход звена x_5) равен *5,8 ед*. Как видим, значительная часть (42%) объема входного потока задержалась в накопителе звена x_3. Если эта величина запаса считается неприемлемой, то следует повышать производительность этого звена сверх установленного допустимого предела (2 ед. / такт). Профиль использования производительности машин (отношение объема на выходе звена к его производительности, u_j) имеет следующий вид: $u_0 = 1$; $u_1 = 1$; $u_2 = 0{,}9$; $u_3 = 1$;

$u_4 = 0{,}4$; $u_5 = 0{,}58$. Потенциал трех из шести машин сети используется не полностью, что ведет к дополнительным потерям. Вопрос о переходе на режимы работы с пониженной производительностью представляется целесообразным ставить только по достижении приемлемого по величине объема потока на выходе сети.

Приведем для сравнения вариант режима работы сети при уровнях производительности промежуточных звеньев не выше средней допустимой величины. Примем следующие значения производительности машин: $p_0 = 10$; $p_1 = 7$; $p_2 = 1$; $p_3 = 4$; $p_4 = 1$; $p_5 = 10$. В этом случае, как показали результаты прогона модели движения потока через сеть, профиль запасов в накопителях имеет вид: $V_0^z = 0$; $V_1^z = 1$; $V_2^z = 1$; $V_3^z = 3{,}6$; $V_4^z = 0$; $V_5^z = 0$. Суммарный запас в накопителях равен *5,6 ед*., объем продукта на выходе сети *4,4 ед*. профиль использования потенциала машин имеет вид: $u_0 = 1$; $u_1 = 1$; $u_2 = 1$; $u_3 = 1$;$u_4 = 0{,}4$; $u_5 = 0{,}44$. Как видим, и в этом случае нет оснований результаты работы сети по критериям величины запасов и загрузки машин также считать удовлетворительными. Это означает, что нет соответствия характеристик сети

параметрам входного потока (объемам и маршрутам движения по технологическим переходам).

Приложение 2. Пример моделирования движения многомерного потока через технологическую сеть

В данном приложении приводится пример, иллюстрирующий работу предложенного в п.3.3 алгоритма моделирования многомерного потока.

Для примера приняты следующие характеристики сети и потоков:

- объемы на входе сети: общий объем $V^{in} = 10$ *ед.*,

  объемы отдельных потоков $V_a^{in} = 5$ *ед.*, $V_b^{in} = 3$ *ед.*, $V_c^{in} = 2$ *ед.*;

- производительности звеньев, представленные векторами

$p_i = (p_{ia}, p_{ib}, p_{ic})$, i = 0,1,2,…,n, (ед. объема/такт):

$p_0 = (10,10,10)$; $p_1 = (10,8,5)$; $p_2 = (6,7,4)$; $p_3 = (3,5,7)$; $p_4 = (4,4,4)$;

$p_4 = (4,4,4)$; $p_5 = (8,6,4)$.

- распределение отдельных потоков при ветвлении по направлениям движения:

поток a: $b_{12} = 0,6$; $b_{13}=0,4$; $b_{24} = 0,2$; $b_{25} = 0,8$;

поток b: $b_{13} = 0,5$; $b_{14}=0,5$;

поток c; $b_{12} = 0,7$; $b_{13}=0,3$.

Расчет движения многомерного потока через сеть производится по модельному мультиграфу последовательно, начиная со звена x_0 с учетом предположения, что в каждом звене входной поток (все его компоненты) задерживается на один такт. Для каждого звена определяется структура входного потока, доли компонент, обобщенная оценка производительности. При этом учитываются номера тактов, в которые поступают на вход звена отдельные потоки. Объем выходного потока звена x_5 принимается в качестве выхода сети. Общий объем выхода сети определяется суммированием выходных объемов последнего звена в различных тактах рассматриваемого интервала времени. Исходные данные, промежуточные и конечные результаты расчета движения потоков представлены в виде таблицы П3.

Как можно видеть из данной таблицы, продукты *a,b,c,* поступившие на вход сети в такте 0 в общем объеме $V^{in} = 10$ *ед.*, на выходе сети появляются в

тактах 3 и 4. Общий объем потока на выходе равен $V^{out} = 7,84$ *ед*. Определены и объемы на выходе отдельных продуктов: *a = 3,92 ед., b =2,35 ед.,c = 1,57 ед.* По этим данным можно оценить «коэффициент выхода» сети: для сети в целом *7,84/10 = 0,784*; такое же значение получим и для отдельных продуктов. Это совпадение объясняется принятым предположением о сохранении пропорций между компонентами в потоках на входе и выходе каждого звена. Запасы образовались только в звене X_1 в объеме *2,16 ед*. Баланс объемов на входе, выходе и в накопителях соблюден (*10 = 7,84+ 2,16*), что подтверждает правильность последовательности расчетов.

Суммарный выход сети за период в два такта равен *Vout* = 7,84 ед. (4,23 + 3,61); запас в накопителе звена x1 равен 2,16 ед. (баланс соблюдается: 7,84 + 2,16 = 10 ед). Таким образом, производительность сети P (в расчете на один такт) может быть оценена средней величиной P = *Vout*/ 2 = 3,92 ед/такт. При этом для большей части звеньев производственные возможности использованы не полностью – имеются резервы в загрузке звеньев x2, x3, x4 и x5. Сдерживающим фактором в движении потока является недостаточная производительность звена x1, в накопителе которого образовался запас продуктов.

Таблица П3. Ход и результаты вычислений при расчете движения многомерного потока через сеть (пример)

Звено сети	Состав и объем входа (*усл. ед*.)	Структура потока (доли в составе общего потока)	Произв-ность по потокам (*усл. ед./такт*)	Произв-ность по входному суммарному потоку	Источник потока	Суммарный объем выхода (*усл. ед*.)	Объем выхода по потокам (*усл.ед.)*	Объем в накопитель (запас) (*усл. ед*.)	Состав, направление и объем выхода
X_0	Потоки a,b,c; V^{in} = 10	d_a = 0,5; d_b= 0,3; d_c = 0,2.	p_a = 10; p_b = 10; p_c = 10.	P_0*= 10	Вне сети	10	a – 5; b – 3; c – 2.	0; 0; 0; 0.	На вход звена X_1
X_1	Потоки a,b,c; V_1^{in} = 10. a – 5; b – 3; c – 2.	d_a = 0,5; d_b= 0,3; d_c = 0,2.	p_a = 10; p_b = 8; p_c = 5.	P_1*= 7,84	X_0	7,84	a – 3,92; b – 2,35; c – 1,57.	∑: 2,16; a – 1,08; b – 0,65; c – 0,43.	На вход звена X_2: (0,6a;0,7c)(2,35+1,1=3,45); На вход звена X_3: (0,4a;0,5b;0,3c) (1,57+1,18+0,47=3,22); X_4: (0,5b)(1,18))
X_2	Потоки a,c; a;2,35; c:1,1; ∑: 3,45.	d_a = 0,68; d_c = 0,32.	p_a = 6; p_c = 4.	P_1*= 5,17	X_1	3,45	a – 2,35; c – 1,1.	∑: 0; a – 0; b – 0; c – 0.	На вход звена X_4: (c)(1,1);(a);(0,2a)(0,47); X_5: (0,8a)(1,88)
X_3	Потоки a,b,c; a – 1,57; b – 1,18; c – 0,47. ∑: 3,22.	d_a = 0,49; d_b= 0,37; d_c = 0,15.	p_a = 3; p_b = 5; p_c = 7.	P_1*= 3,82	X_1	3,22	a – 1,57; b – 1,18; c – 0,47.	∑: 0; a – 0; b – 0; c – 0.	На вход звена X_4: (c)(0,48); На вход звена X_5: (a)(1,57);(b)(1,18)

X_4	Потоки a,b,c; a – 0,47; b – 1,18; c – 0,47+1,1=1,57. ∑: 3,22.	d_a = 0,15; d_b= 0,37; d_c = 0,49.	p_a = 4; p_b = 4; p_c = 4.	P_1*= 4	X_1(b) X_2(a,c) X_3(c)	3,22	a – 0,47; b – 1,18; c – 1,57.	∑: 0; a – 0; b – 0; c – 0.	На вход звена X_5: (a)(0,47); (b)(1,18); (c)(1,57)
X_5	Потоки a,b,c; a – 1,88; b – (1,18+1,18 =2,35); ∑: 4,23.	d_a = 0,44; d_b= 0,56;	p_a = 8; p_b = 6;	P_1*= 6,74	X_2(a) X_3(a,b) X_4(b)	4,23	a – 1,88; b – 2,35;	∑: 0; a – 0; b – 0; c – 0.	Выход из сети ∑: 4,23. a – 1,88; b – 2,35;
X_6	Потоки a,c: a – 0,47+1,57=2,04; c – 1,57; ∑: 3,61.	da = 0,57; dc = 0,43.	p_a = 8; p_c = 4.	P_1*= 5,6	X_4(a) X_4(c)	3,61	a – 2,04; c – 1,57.	∑: 0; a – 0; b – 0; c – 0.	Выход из сети ∑: 3,61. a – 2,04; c – 1,57;

Приложение 3. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669241

Программа системной оптимизации производственных процессов компьютерной модели технологической сети

Правообладатель: ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Автор(ы): ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Заявка № **2024667973**
Дата поступления **31 июля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***15 августа 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Копия свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024669241 от 15.08.2024

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669227

Программа параметрической, структурной адаптации технологических сетей и системной оптимизации производственных процессов

Правообладатель: ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Автор(ы): ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Заявка № **2024667965**
Дата поступления **26 июля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***15 августа 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Копия свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024669227 от 15.08.2024

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669228

Программа компьютерного моделирования технологических сетей

Правообладатель: ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Автор(ы): ***Платонов Дмитрий Евгеньевич (RU)***

Заявка № **2024667964**
Дата поступления **25 июля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***15 августа 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Копия свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024669228 от 25.08.2024

Приложение 4. Копии документов, подтверждающих практическое использование результатов диссертации на предприятиях машиностроения

ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ
Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение **«Академия машиностроения имени Ж.Я. Котина»** (СПб ГБПОУ «АМК»)
«Ассоциированная академия Союза машиностроителей России»
ул. Бабушкина, д.119, лит. А, Санкт-Петербург, 192174, Тел./факс (812) 362-32-15
E-mail: info@academykotin.ru http://www.academykotin.ru
ОКПО 00211777, ОГРН 1027806073811, ИНН/КПП 7811034620/781101001

УТВЕРЖДАЮ
СПб ГБПОУ «АМК»
Ищенко Т.А.
«12» сентября 2024г.

С П Р А В К А
об использовании результатов исследования ПЛАТОНОВА Д.Е. на тему «Разработка методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов»

Настоящая справка выдана в том, что материалы диссертации, выполненной Платоновым Дмитрием Евгеньевичем, на тему «Разработка методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов», в части, относящейся к методам, алгоритмам и программам моделирования движения партий изделий в производстве, оптимальной коррекции производительности оборудования технологической сети и выбора рациональных маршрутов, прошли проверку в производственном центре машиностроения СПб ГБПОУ «Академия машиностроения имени Ж.Я.Котина» при оперативном планировании процессов механической обработки и изготовления нескольких партий изделий. При решении в экспериментальном режиме задач системной оптимизации процесса производства было достигнуто сокращение простоев оборудования по организационным причинам и объемов незавершенного производства на технологических переходах, что обеспечило сокращение суммарных затрат по этим причинам на 10-30% (в зависимости от состава оперативных заданий).

По результатам проверки в производственных условиях разработки Д.Е. Платонова приняты в опытную эксплуатацию в цехах: токарных, фрезерных и механосборочных работ.

Начальник учебно-технологического отдела Иванов А.А.

Копия справки об использовании результатов исследования СПб ГБПОУ «АМК»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «МПП»
Кудиков Д.А.
«__» _____ 2024г.

СПРАВКА

об использовании результатов исследования ПЛАТОНОВА Д.Е. на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов»

Настоящая справка выдана в том, что материалы исследования, выполненного Платоновым Дмитрием Евгеньевичем, на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов», были рассмотрены специалистами предприятия и получили в целом положительную оценку. Представленные методики оценки и повышения производительности технологических сетей признаны достаточно обоснованными и имеющими практическое значение.

С учетом специфики номенклатуры изделий технологии и организации производства приняты к использованию в практике управления предложенные Платоновым Д.Е. методики и программные средства для расчета обобщенной оценки производительности машины при поступлении на вход многопродуктового потока с известной структурой и компьютерного моделирования движения через сеть по различным маршрутам потоков продуктов различных видов.

Также приняты к использованию прошедшие государственную регистрацию компьютерные программы «Программа компьютерного моделирования технологических сетей» и «Программа параметрической, структурной адаптации технологических сетей и системной оптимизации производственных процессов».

При использовании указанных методик и программных продуктов ожидается получение экономического эффекта за счет сокращения простоев высокопроизводительного оборудования и уменьшения объема незавершенного производства.

Директор по производству Ярмощук А.В.

ООО «МЕХПРОМПРОЦЕСС» (ООО «МПП»), юридический адрес: 194358, город Санкт-Петербург, Заречная,19, к.1, литера А.

Контактные телефоны: +7812 596-57-77, +7 812 596-57-67

Копия справки об использовании результатов исследования ООО «МЕХПРОМПРОЦЕСС»

Северный Технопарк

Общество с ограниченной ответственностью «Северный Технопарк»
ОГРН 5067847007157 ИНН 7814343874, КПП 781101001
р/с 40702810412010633797 в Филиал «Корпоративный» ПАО «Совкомбанк»
к\с 30101810445250000360 БИК 044525360
Юридический адрес: 192012, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Обуховский, ул. Бабушкина, д. 123, литера В, помещ. 1Н, помещ. 47
Почтовый адрес: 192012, г. Санкт-Петербург, а/я 67, ООО «Северный Технопарк»
тел.:+7(812) 325-02-43 www.spbstp.ru obrabotka@spbstp.ru

Система менеджмента качества сертифицирована
в соответствии с требованиями ISO 9001-2015, ГОСТ Р ИСО 9001-2015
и ГОСТ РВ 0015-002-2020

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Северный технопарк»
_____ И.В. Ермаков
«22» 08 2024 г.
ПЕЧАТЬ

А К Т
об использовании результатов исследования ПЛАТОНОВА Д.Е. на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов»

Настоящим актом подтверждается, что исследования Платонова Дмитрия Евгеньевича на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов» и дополнительные материалы, представлены для оценки и практического использования.

По оценке специалистов предприятия результаты исследования представляют интерес, так как ориентированы на решение организационных и плановых задач, характерных для многомашинных систем (технологических сетей) на предприятиях машиностроения и механообработки.

К использованию в практике оперативного управления производством приняты компьютерные программы оценки производительности технологической сети при обработке многопродуктовых потоков на основе компьютерной имитации прохождения потоков через сеть по установленным технологическим маршрутам

Использование предложенных в работе Платонова Д.Е. методов выявления и повышения производительности оборудования в технологических сетях в условиях предприятия при выполнении операций механической обработки изделий, производства инструмента и металлических деталей позволит повысить уровень организации производства и эффективности деятельности предприятия.

Начальник тех.отдела С.Ю. Винокурова

Заместитель генерального директора
по проектам и стратегическому развитию С.Н. Арсеньев

Копия акта об использовании результатов исследования

ООО «Северный технопарк»

redfab

ООО "НПК Антей"
ИНН 7814642289 | КПП 784201001
Юр. Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Гельсингфорсская д. 4, корп. 1, офис 3А
+7 812 425-62-32 | info@redfab.ru

БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ:
СТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ Ф-Л ПАО "ПРОМСВЯЗЬБАНК"
К/С: 30101810000000000920
Р/С: 40702810206000098411
БИК: 044030920

г. Санкт-Петербург

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «АНТЕЙ»
Михайленко К.В.
«9» сентября 2024г.

СПРАВКА

Об использовании результатов исследования ПЛАТОНОВА Д.Е. на тему: «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов».

Настоящая справка выдана в том, что материалы исследования, выполненного Платоновым Дмитрием Евгеньевичем, на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов», были рассмотрены специалистами предприятия и получили в целом положительную оценку. Представленные методики оценки и повышения производительности технологических сетей признаны достаточно обоснованными и имеющими практическое значение.

С учетом специфики номенклатуры изделий, технологии и организации производства приняты к использованию в практике управления, предложенные Платоновым Д.Е. методики и программные средства для расчета обобщенной оценки производительности машины при поступлении на вход многопродуктового потока с известной структурой и компьютерного моделирования движения через сеть по различным маршрутам потоков продуктов различных видов.

Также приняты к использованию прошедшие государственную регистрацию компьютерные программы «Программа компьютерного моделирования технологических сетей» и «Программа параметрической, структурной адаптации технологических сетей и системной оптимизации производственных процессов».

При использовании указанных методик и программных продуктов ожидается получение экономического эффекта за счет сокращения простоев высокопроизводительного оборудования и уменьшения объема незавершенного производства.

Заместитель генерального директора по разработке и производству ООО «НПК «Антей»

Каширин И. С.
09.09.2024

Копия справки об использовании результатов исследования ООО «НПК «АНТЕЙ»

СЕРВИС ОБОРУДОВАНИЯ ПОСТАВКИ ОСНАТСКИ ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ

Общество с ограниченной ответственностью
«Мкод»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «МКОД»
Горячева А. Ю.
«15» октября 2024 г.
ПЕЧАТЬ

А К Т
об использовании результатов диссертации ПЛАТОНОВА Д.Е. на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе цифрового моделирования и системной оптимизации производственных процессов»

Настоящим актом подтверждается, что диссертационная работа Платонова Дмитрия Евгеньевича на тему «Разработка и совершенствование методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе цифрового моделирования и системной оптимизации производственных процессов» и дополнительные материалы, представлены для оценки и практического использования.

По оценке специалистов предприятия результаты исследования представляют интерес, так как ориентированы на решение организационных и плановых задач, характерных для многомашинных систем (технологических сетей) в сфере машиностроения и механообработки.

Использование предложенных в работе Платонова Д. Е. методов выявления и повышения производительности оборудования в технологических сетях в условиях предприятия при выполнении операций механической обработки изделий, производства инструмента и металлических изделий позволит повысить уровень организации производства и эффективности деятельности предприятия.

Ведущий инженер Сычев Е. Л.

ООО «МКОД», г. Санкт-Петербург, пр-кт Трамвайный, д. 12 к. 2 литер а, оф. /пом 58/4Н., контактный телефон +7 (812) 922-84-17, сайт: http://mcode-spb.ru/

198207, Санкт-Петербург, Трамвайный пр., д.12, к.2, литер А, офис 58, пом. 4Н
ИНН/КПП 7810554271/780501001
ОГРН 1097847138432
Банковские реквизиты: Акционерное общество «ЮниКредит Банк»
(АО ЮниКредит Банк) Петербургский филиал, БИК 044030858
р/сч 40702810400023696670, к/сч 30101810800000000858
тел./факс +7(812)9228417 E-mail: nastya130983@gmail.com

Копия акта об использовании результатов исследования

ООО «МКОД»