

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» на кафедре менеджмента.

Научный руководитель: **Архипов Александр Валентинович** доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Институт межотраслевых перспективных исследований, научный руководитель

Официальные оппоненты: **Черненькая Людмила Васильевна** доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор высшей школы компьютерных технологий и информационных систем

Рымкевич Ольга Васильевна кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, доцент кафедры физики

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Защита состоится 24.03.2026 года в 13 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.385.03
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. На предприятиях различных отраслей с мелкосерийным типом производства, широкой номенклатурой и частой сменяемостью продукции отсутствие сопряженности технологических переходов по производительности ведет к снижению эффективности использования оборудования, образованию сверхнормативных межоперационных запасов. 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 освещены 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 Беззудный 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., Лазарида С.К., Макарова А.Г., Мищенина 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 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 управления производительностью 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 управлений 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 номера пунктов 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 характеристиками, усредненными на обоснованно выбранных интервалах оценки производительности машин; разработана модель технологической установки, выполняющей преобразование входного потока продуктов, отражающая характерные для мелкосерийных производств 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 управления производительностью сети путем 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:

- теоретически обоснован алгоритм определения максимального потока через технологическую сеть с использованием понятия разреза графа и 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 и 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 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. Сделан вывод о важности и актуальности разработки методов оценки и повышения производительности действующих технологических систем. Такие оценки зависят не только от показателей отдельных единиц оборудования, но также от ряда организационных факторов и «системных эффектов». Такое положение повышает значимость оценок производительности как ключевого фактора эффективности деятельности.

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, в англоязычном варианте, 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 в главе 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. В качестве примера производственной системы, представляющей собой технологическую сеть, приведен цех механической обработки металлических изделий. В цехе проходят обработку детали разных видов, перемещаясь по установленным маршрутам согласно соответствующей технологии. Структура связей между переходами (машинами, участками) в виде ориентированного графа приведена на рис.1. Производительность оборудования зависит от вида обрабатываемых деталей и устанавливается в виде соответствующих норм. Большое разнообразие видов продуктов и режимов обработки порождает проблему сопряженности переходов по производительности, решение которой определяет уровень потерь вследствие простоев машин на одних переходах при возникновении излишних запасов продуктов на других. Такие ситуации характерны для мелкосерийных производств дискретного типа с широкой номенклатурой изделий.

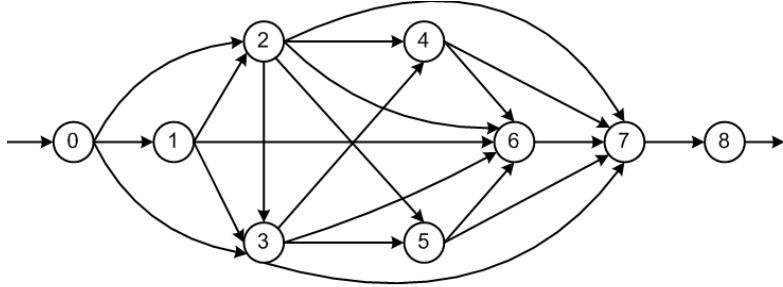


Рис.1. Структурная модель цеха механообработки

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

Во второй главе «Модели потоков работ и оценки производительности технологических машин» рассматривается подход к описанию потоков продуктов, проходящих последовательную обработку на машинах технологической 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. Потоки представляются как регулярные последовательности партий продуктов равного объема, перемещающиеся по машинам в дискретные моменты времени. Интервал между смежными моментами времени назван «тактом модели сети» (для краткости далее используется термин «такт»).

В данной главе рассматривается также вопрос построения обобщенной оценки производительности машины при обработке многопродуктового потока в случае, когда нормы производительности различаются для отдельных видов продуктов. Предложенная формула для расчета обобщенной оценки производительности машины p^* имеет вид:

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

где p_j – производительность машины при обработке j -го вида продукции, $j = 1, \dots, m$;
 d_j – доля j -го вида продукции в общем потоке на входе машины.

Приведены примеры расчетов производительности с использованием формулы (1), в частности, выполнен расчет производительности установки S-CUT термической резки листового проката металлов различных толщин при использовании газокислородной технологии.

Глава завершается описанием модели преобразования потока работ в технологическом звене при характерной для мелкосерийного производства организации загрузки машин. Статическая характеристика звена (технологической машины, установки, станка) принята в следующем виде:

$$V_i^{out}(t_0 + \tau) = \min \left\{ k_{ij}^{вых} V_i^{in}(t_0); p_i(t_0) \right\}, \quad (2)$$

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, $k_{ij}^{вых} \leq 1$); $p_i(t_0)$ – значение нормы производительности i -го звена в момент времени t_0 .

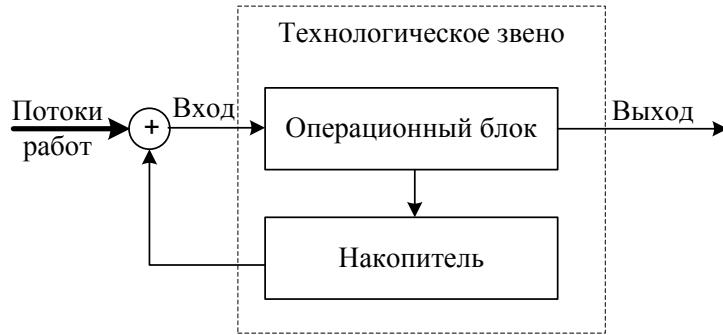


Рисунок 2. Схема звена, состоящего из двух блоков: функционального преобразователя (операционный блок) и накопителя

Особенностью принятой модели является выделение в структуре звена двух частей: функционального блока и накопителя. Структура модели звена представлена на рис.2. В накопитель попадает часть $V_i^z(t)$ партии продукта на входе звена, превышающая его производительность (на интервале t , равном такту):

$$V_i^z(t) = \max \left\{ \left(V_i^{in}(t) - p_i \right); 0 \right\} \quad (3)$$

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 анализа таких объектов. Отмечены основные отличия: в общем случае нефиксированная структура сети, формирующаяся в зависимости от установленных маршрутов потоков; 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 производительности сети может служить величина максимального потока через данную сеть. Описаны преобразования графа, позволяющие при рассмотрении однопродуктового потока применить к поиску максимального потока в сети известные в теории графов методы оценки, в том числе, использующие понятие разреза графа и теорему Форда-Фалкерсона. Предложена процедура оценки максимального потока, учитывая специфику технологической сети.

Для потоков с произвольной размерностью (одно- и многопродуктовых) предложены алгоритмы, в которых по результатам компьютерной имитации их перемещения по машинам сети в соответствии со своими технологическими маршрутами производятся расчеты оценок производительности сети. Моделирование осуществляется на интервале $[0;T]$ с использованием дискретной шкалы времени. Алгоритмы реализуют преобразование сетью вектора входных объемов продуктов $V^{in}(t_0)$ в вектор объемов продуктов на выходе сети $V_{max}^{out}(t_1, \dots, t_n)$. Также в результате работы алгоритмов определяются значения таких выходных характеристик, как объемы продуктов в накопителях, оценки использования производительности звеньев, запаздывания выхода продуктов относительно входа. Вектор нормативных значений производительности машин сети $P = (p_1, \dots, p_n)$ и структура сети (маршруты движения предметов труда) на данном этапе исследования рассматривались как фиксированные параметры.

Для каждого j -го звена ($j = 1, 2, \dots, n$) абсолютные оценки резервов производительности и относительные оценки использования норм производительности определялись для каждого

$t \in [0; T]$ по формулам:

$$V_j^h(t) = \max \left\{ \left(p_j(t) - V_j^{out}(t) \right); 0 \right\}, \quad j = 1, \dots, n;$$

$$V_j^{ucn}(t) = \frac{V_j^{out}(t)}{p_j(t)}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Эти оценки использовались в дальнейшем для выбора направлений изменения производительности звеньев с целью роста показателя интегральной эффективности сети в целом.

В приведенных рассуждениях предполагалось, что поток на входе сети является однопродуктовым и в процессе продвижения подвергается ветвлению по видам обработки, формируя многообразие маршрутов. Пример модельного графа для такой ситуации представлен на рис.3. На схеме возле дуг указаны: обозначение потока a с указанием в скобках номера такта, в котором партии продукта появляются на выходе звена; доли выходного объема продукта на выходе звена, направляемые по данной дуге. Эти данные используются при расчете дискретного процесса движения потока через сеть.

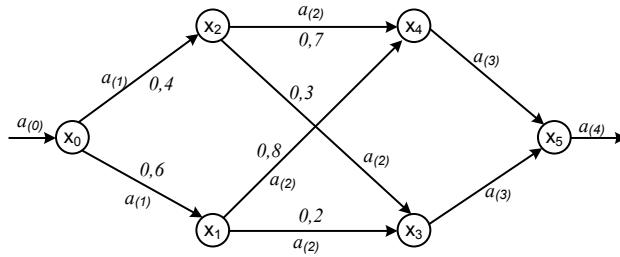


Рисунок 3. Пример модельного графа для описания движения через сеть однопродуктового входного потока

В случае многопродуктового потока расчеты несколько усложняются из-за различий в маршрутах движения отдельных потоков и зависимости производительности звеньев от вида продуктов. Структурная модель сети приобретает вид мультиграфа (см. рис. 4). При этом логика процедуры моделирования принципиально не изменяется.

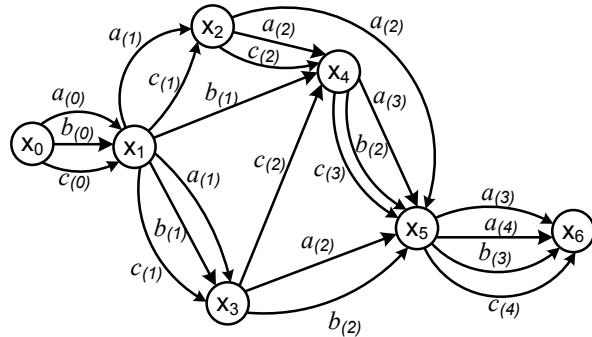


Рисунок 4. Мультиграф, отражающий направления движения в сети компонент a, b, c многопродуктового потока

Глава завершена выявлением с помощью компьютерных экспериментов зависимости различных видов потерь в конкретной сети при изменении объема потока на ее входе. Характерный вид зависимостей представлен на рис.5.

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, определяющие структуру связей между звенями 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 критериям минимума потерь вследствие неполного использования производительности оборудования и возникновения сверхнормативных запасов продуктов в накопителях. Предложены две схемы построения алгоритмов. Одна из них базируется на идее ограниченного перебора возможных сочетаний допустимых уровней производительности звеньев сети.

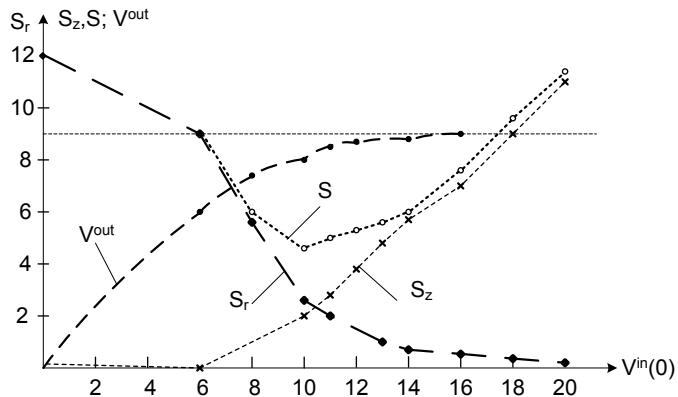


Рисунок 5. Зависимости объема на выходе сети (V^{out}) и величин потерь разных видов от объема потока на входе сети ($V^{in}(0)$) (S_r – суммарные потери из-за неполного использования производительности звеньев; S_z – суммарные потери из-за возникновения сверхнормативных запасов на переходах; S – суммарные потери по двум указанным причинам)

Другая схема использует процедуру последовательных расчетов, обеспечивая поиск значений показателей, при которых запасы равны установленным нормативам h_j , $j = 1, \dots, n$, возможно, нулевым. В этом случае для каждого звена формируется балансовое соотношение, уравнивающее вход и выход при нормативном уровне запаса в накопителе. Совокупность таких соотношений дает систему уравнений, легко решаемую способом последовательного счета, начиная с первого звена сети, для которого источники входного продукта могут находиться вне сети:

$$\sum_{k \in K_j} p_k b_{kj} (1 - h_j) = p_j, j = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad (5)$$

где K_j – множество машин (звеньев сети), с выходов которых продукты поступают на вход j -й машины; b_{kj} – доля выходного потока k -го звена ($k \in K_j$), направляемая на вход j -го звена, $0 \leq b_{kj} \leq 1$.

Порядок расчета устанавливается по матрице смежности модельного графа.

Для возможности применения данной схемы должны быть выполнены определенные условия, относящиеся к структуре модельного графа технологической сети. В главе формулируются эти условия и на их основе вводятся понятия полной и условной сбалансированности сети, позволяющие установить достижимые пределы эффективности.

Найденные в результате решения системы (5) значения производительности (они называются «идеальными») могут оказаться технически не реализуемыми, и требуется их коррекция путем замены подходящими допустимыми значениями. Предложены алгоритмы такой коррекции.

Далее в главе рассмотрены алгоритмы выбора таких сочетаний маршрутов движения потоков, входящих в многопродуктовый поток в сети, при которых достигаются оптимальные по заданным критериям параметры производительности сети.

В одном из алгоритмов, применена схема сокращения перебора комбинаций маршрутов, использующая идею двоичного кодирования: для каждой комбинации из основных и резервных маршрутов, формируется свой двоичный код. Правило формирования кода: выбору основного (предпочтительного) маршрута соответствует код «1», выбору резервного маршрута – код «0». Таким образом, наиболее предпочтительной комбинации, состоящей из основных маршрутов, соответствует код из m единиц (m – число потоков продуктов, проходящих через сеть). Выбор производится из множества комбинаций, наиболее близких, по мнению лица, принимающего решение, к самому предпочтительному, варианту. В качестве меры близости вариантов используется известное в анализе двоичных кодов расстояние Хемминга. Наложив ограничение на максимально допустимое расстояние, можно ограничить количество анализируемых вариантов структуры сети, среди которых производится выбор.

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 рис. 1 (с.7 автореферата).

Некоторые машины (станки) 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).

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 1. Варианты возможного назначения машин для выполнения технологических операций представлены в таблице 2.

Таблица 1. Оборудование, используемое для производства изделий A1 и A2

Код	Тип	Наименование	Значения норм производительности машин по операциям,[шт/такт]
11	CP3 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	Специальное оборудование, рабочее место контроллера OTK	Операция 1-4: 80 Операция 4-1: 76

Таблица 2. Варианты закрепления машин (станков) за технологическими операциями

Код/Наименование операции	Варианты используемого оборудования (с указанием кодов машин)
Изделие А1	
1-1-операция: заготовительная	11-CP3 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-CP3 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

В исходных данных указываются диапазоны и «шаг» изменения объемов производства каждого из изделий. Также указываются удельные величины экономических потерь трех видов.

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, т.е., в результате решения «локальной» задачи оптимизации. В последующем, в процессе параметрической адаптации эти значения корректируются так, чтобы обеспечить минимальное значение системного критерия (минимум потерь на функционирование сети в целом). В результате выполнения этапа параметрической адаптации для скорректированных уровней производительности рассчитываются оптимальные объемы партий продуктов каждого вида.

Для дополнительного сокращения критерия суммарных затрат на следующем этапе выполняется процедура структурной адаптации. При найденных на предыдущем этапе значениях производительности машин с использованием допустимой замены используется 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. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

В рассмотренном примере относительное сокращение удельных (за тakt модели) суммарных потерь на единицу производительности достигло весьма заметной величины (34%) ($714 - 470/714 \times 100\%$). Величина сокращения потерь для большей части выполненных расчетов находилась в диапазоне от 10 до 35%.

Использованный в диссертации и иллюстрированный приведенным примером подход, имеет следующие особенности: в процедуре оптимизации в качестве целостного объекта рассмотрен комплекс из множества машин и множества потоков продуктов; использованы такие разнородные «переменные» как показатели производительности машин и маршруты движения работ; организация согласованные процедуры поиска рационального решения осуществлялись по общему критерию; для выбора направления поиска и сокращения перебора вариантов использованы эвристические приемы с возможностью их замены при изменении требований задачи. Эти особенности дают основание отнести данный подход к идеологии системной оптимизации производственного процесса.

Таблица 3. 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, Сумма затрат 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, Сумма затрат 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, Сумма затрат 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, Сумма затрат 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, Сумма затрат 2116 Общие затраты на ед. производительности: 470

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

В Приложении изложены описания ряда алгоритмов с численными примерами, приведены документы, подтверждающие практическое использование результатов исследования, также копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа технологических ресурсов предприятий выделен класс многомашинных систем, в которых элементами являются единицы оборудования различного назначения, а организационно-технологические связи между ними вследствие разнообразия маршрутов перемещения работ образуют сетевую структуру; выявлены особенности таких технологических сетей как объектов организации производства на предприятиях рассматриваемого типа.

2. Разработаны математические модели одно- и многопредметных потоков работ, в которых для целей оценки производительности машин использованы характеристики потоков,

усредненные на обоснованно выбранных интервалах оценки производительности машин; разработана модель технологической машины, выполняющей преобразование входного потока продуктов, отражающая характерные для мелкосерийных производств особенности организации функционирования различных видов обрабатывающего оборудования.

3. Разработан и теоретически обоснован метод оценки максимально достижимой производительности технологической сети при обработке однопродуктового потока по величине «максимального потока», определяемой с использованием понятия разреза графа и теоремы Форда-Фалкерсона. Метод предполагает предварительное преобразование по известным правилам модели технологической сети и учитывает ее специфические особенности, вытекающие из характерных свойств мелкосерийных производств.

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 при заданных характеристиках входных потоков устанавливаются объемы продуктов на выходе сети, объемы запасов, аккумулируемых в накопителях звеньев, резервы производительности звеньев, не использованные при выполнении работ, некоторые другие показатели, позволяющие оценить эффективность функционирования сети. Разработанное специализированное программное обеспечение расчетов предложено в качестве инструмента решения задач анализа производственных ситуаций и принятия управлеченческих решений.

5. Предложено ввести в научный оборот понятие «адаптивные технологические сети», определяющим и отличительным свойством которых предложено считать возможность изменения (с учетом известных ограничений) таких характеристик, как производительность звеньев (машин) и маршруты обработки изделий в сети для ее адаптации к характеристикам входных потоков работ и на этой основе повышения эффективности производства. При анализе сети предложено использовать понятия полной и условной сбалансированности сети, даны их определения и условия достижимости.

6. Разработаны практические инструменты обеспечения адаптивности сети в виде методов, алгоритмов и компьютерных программ параметрической и структурной адаптации сети, цель которых состоит в оптимизации по принятым при проектировании сети критериям, как значений производительности машин, так и маршрутов движения потоков. При согласованной работе алгоритмов и программ в циклическом режиме реализуется принцип 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».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ

1. 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.

2. 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.

3. Платонов Д.Е. Резервы повышения производительности технологических сетей/ Д.Е. Платонов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12. Тула. Издательство ТулГУ. 2023. – С.323–326. - DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-323-324.

4. 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.352–355. - DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-352-353.

Прочие публикации

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

6. 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.

7. 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.

8. Платонов Д.Е. Деградационные модели в оценке производительности технологического оборудования / 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. 78-90.

9. 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 междунар. науч.-практ. конф. – №7-8 (69). – М., Изд. «Интернаука», 2023. – С.46 – 55.

10. 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

11. Платонов Д.Е. Управление производительностью технологических сетей // Д.Е. Платонов, А.В. Архипов. Молодой исследователь: вызовы и перспективы. Сб. ст. по материалам CCCXVIII междунар. науч.-практ. конф. – № 29(318). – М., Изд. «Интернаука», 2023. – С. 145 – 155.

12. «Программа параметрической, структурной адаптации технологических сетей и системной оптимизации производственных процессов» / Платонов Д.Е. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2064669227. - в Реестре программ для ЭВМ 15.08.2024. – Язык программирования: Java. – Объём: 30 375 байт.

13. «Программа компьютерного моделирования технологических сетей» / Платонов Д.Е. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2064669228. - в Реестре программ для ЭВМ 15.08.2024. – Язык программирования: Java. - Объём: 18 984 байт.

14. «Программа системной оптимизации производственных процессов компьютерной модели технологической сети» / Платонов Д.Е. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2064669241. - в Реестре программ для ЭВМ 15.08.2024. – Язык программирования: Java. - Объём: 33 412 байт.