

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,  
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

на правах рукописи

Феноменов Михаил Александрович

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ  
ПЕРЕХОДА К СЕТЯМ 5G**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Гольдштейн Александр Борисович

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА WFM В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ СЕТЯМИ СВЯЗИ.....	13
1.1. Эволюция систем эксплуатации сетей связи .....	13
1.2. Актуальные аспекты архитектуры ODA и интеграция WFM в OSS/BSS21	
1.3. Эволюция управления персоналом WFM.....	25
1.4 WFM в IT-ландшафте телекоммуникационной компании и математические модели WFM .....	30
1.5 Цель и задачи исследования.....	32
Выводы главы 1 .....	35
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ WFM ОПЕРАТОРА СВЯЗИ .....	37
2.1. Эволюция математических моделей управления сетью .....	37
2.2. Трехфазная математическая модель WFM .....	41
2.3. Сравнение вероятностно-временных характеристик WFM.....	45
2.4. Оптимизация WFM.....	47
2.5. Расчет математической модели WFM.....	51
2.6. Модель нейронной сети WFM .....	60
Выводы главы 2 .....	65
ГЛАВА 3. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗИЯ WFM.....	67
3.1. Планирование смен эксплуатационного персонала Оператора связи .....	67
3.2. Планирование выходных дней.....	70
3.3. Планирование смен .....	82

3.4. Задача циклического укомплектования персонала.....	86
3.5. Применение циклического штатного расписания .....	89
3.6. Расписание работы ремонтных бригад .....	93
Выводы главы 3 .....	100
ГЛАВА 4. ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ WFM ПРОВАЙДЕРОВ ЦИФРОВЫХ УСЛУГ .....	101
4.1. Открытая цифровая архитектура ODA .....	101
4.2. WFM/ODA в сетях 5G+.....	104
4.3. Система управления рабочими ресурсами WFM через призму ODA ...	109
4.4. Инженерные задачи WFM в сетях пост-NGN .....	125
Выводы главы 4 .....	129
Заключение.....	130
ЛИТЕРАТУРА .....	133
Список сокращений.....	149
Приложение 1. Акты о внедрении .....	153
Приложение 2. Программа нейронной сети. ....	156

# **ВВЕДЕНИЕ**

## **Актуальность темы диссертации.**

Развитие мультисервисных сетей связи поколений 5G/6G, переход к эпохе пост-NGN с технологиями SDN/NFV, возникновение архитектур IoT и IIoT, распространение разнообразных облачных и туманных сервисов привели к резкому усложнению систем эксплуатационного управления OSS/BSS (Operation Support System/Business Support System), средств технического учета (Inventory), элементов подготовки/предоставления услуг (Service Provisioning), всего ИТ-ландшафта инфокоммуникационных Операторов.

Управление персоналом (WFM) инфокоммуникационных Операторов в этих условиях приобретает все более и более важное значение. По сравнению с рутинным распределением заявок между телефонными монтерами бюро ремонта сетей фиксированной телефонной связи прошлого века современная система WFM оперирует несоизмеримо большими наборами выполняемых функций, широким спектром профессиональных компетенций и ключевых показателей эффективности (KPI).

В связи с этим возникла потребность научного анализа методов и моделей организации многопрофильного эксплуатационного персонала Оператора пост-NGN, как и потребность решения методологических и технических вопросов построения эффективной сетевой архитектуры WFM. Одной из составных частей этого анализа является настоящая диссертация, что и делает ее безусловно актуальной

## **Степень разработанности темы.**

Развитие теории эксплуатационного управления телекоммуникационными сетями восходит к началу централизации технической эксплуатации ТфОП, чему посвящено множество работ, среди которых следует выделить полученные в самом конце XX и в первой декаде XXI веков результаты наших ученых – сотрудников ЛОНИИС Л.Б.

Маримонта, В.Л. Морева, Я.Г. Кобленца, работы Я.С. Дымарского, А.А. Костина, А.Я. Шалаева, выполненные также в Санкт-Петербурге, но уже в СПбГУТ им.проф.М.А.Бонч-Бруевича, работы московского профессора В. А.Нетеса, исследования, проводимые в ИППИ РАН, ЦНИИС, МТУСИ. Имеется целый ряд более поздних и близких к тематике диссертации работ, среди которых следует выделить статьи и защищенную в 2020 году докторскую диссертацию моего научного руководителя А. Б. Гольдштейна «Модели и методы управления инфокоммуникационными сетями» и работы его научного консультанта проф. А. Е. Кучерявого, а также опубликованные недавно сразу три англоязычные монографии, целиком посвященные WFM.

Кроме того, в последнее время опубликован целый ряд научных статей, посвященных моделям и методам современных WFM. Среди них имеет смысл отметить следующие научные публикации. [73, 75] предлагает эффективную стратегию, ориентированную на стоимость и доставку. В статьях фиксируется связь между операционной стратегией и ее теорией. Встреча с менеджерами среднего звена помогает проанализировать восприятие операционных стратегий. В документе предполагается, что инфраструктурные категории трудно воспроизвести, и их полная выгода извлекается только в том случае, если они погружаются в бизнес-стратегию.

В [79, 85] изучаются финансовые затраты и экономическая эффективность обучения. Проанализированы подходы к обучению на основе семинаров и обучению LDHF. В статьях исследуются предпочтения и представления об обучении. Они провели структурированные интервью со стажерами и вычислили стоимостные оценки. В [92] распределили часы обучения и минимизировали общие затраты на качество. Здесь уже учитываются затраты на профилактику, стоимость оценки и стоимость отказа. Разработанная модель включает организационный и индивидуальный подход обучения-забывания. [92] анализирует различные модели, доступные в литературе. Здесь обсуждается в том числе использование модели

Киркпатрика.

[77] предлагает математическую модель, основанную на линейном программировании, для определения оптимального количества обучаемых. С помощью модели рассчитывается оптимальное количество обучаемых, необходимых для различных курсов обучения. Модель применяется к реальной жизненной ситуации и обеспечивает максимальное использование ресурсов обучения.

Такие факторы, как производительность, рабочая сила и размер группы, объединяются в [79] для определения оптимального их соотношения для многопродуктовой, многостадийной и многомодельной производственной системы. Система предоставляет подробный план распределения рабочей силы, который оптимизирует мощности, размер группы. Модель основана на линейном программировании для снижения производственных затрат. Численная иллюстрация подтверждает работоспособность модели.

Стратегическое планирование персонала влияет на эффективность фирмы [85]. Предложена математическая оптимизационная модель для решения кадрового планирования. Модель принимает в качестве исходных данных стратегии, политику и цели компании, а также оптимизирует затраты и персонал. Модель тестируется в режиме реального времени в международной корпорации. [135] объясняет использование системы поддержки принятия решений (DSS) для эффективной оптимизации и управления кадровым планированием. Система решает различные уровни принятия решений, такие как тактический, оперативный и стратегический. [141] помогает понять восприятие стратегии операций при принятии решений. Обнаружены два альтернативных набора операционных стратегий, таких как ресурсы и поток. Представлена концептуальная модель для принятия решений на основе данных [103]. Найдены математическая модель и аналитические результаты для двухкатегорийной организации. Рассчитывается дисперсия времени прихода сотрудника на работу [106]. [96] направлен на изучение пропорций нанятых,

повышенных в должности и уволенных сотрудников и прогнозирование будущих потребностей. В статье исследована структура профессорско-преподавательского состава университета Уйо, Нигерия, с использованием моделей цепей Маркова. Разработанная модель работает в рамках отсутствия контроля за наймом. Предлагается новая структура для оптимизации найма и увольнения [112]. Модель устанавливает несколько параметров, таких как трудовые права, технические и управленческие ограничения. С помощью алгоритма динамического программирования определяется оптимальный режим и продолжительность занятости для разных работников в зависимости от их квалификации. Предлагается лексикографический метод решения многокритериальной модели программирования распределения рабочей силы для оптимизации планирования производства [113]. Для моделирования рассматривается поточное производство единичных изделий. Модель линейного программирования с тремя целевыми функциями была разработана и решена для получения оптимального решения. Для трудоемких производств разработана новая модель распределения рабочей силы [124]. В документе основное внимание уделяется распределению рабочей силы, а система поддержки разработана на основе концепций холонических производственных систем и эталонной архитектуры PROSA. Результаты свидетельствуют об эффективности применения модели для увеличения производительности труда.

Но большинство вышеуказанных моделей ориентированы на различные производственные ситуации, транспортные задачи и даже организацию преподавания в университетах. Эти области применения являются более традиционными и полнее исследованы. Они существенно отличаются от задач WFM для современных инфокоммуникационных операторов/провайдеров с учетом принципиально новых телекоммуникационных сервисов и технологий.

Более того, с критериями и принципиальным подходом к WFM в инфокоммуникациях дело обстоит несколько иначе: задержки в выполнении текущих

задач WFM, качество и надежность инсталляций и эксплуатационного сопровождения инфокоммуникационных услуг определяют выполнение или невыполнение SLA (Service Level Agreement), а следовательно – эффективность функционирования сети Оператора связи и его конкурентоспособность на сегодняшнем и завтрашнем телекоммуникационном рынке.

Поэтому в данной диссертационной работе рассматриваются модели WFM как одного из ключевых элементов OSS/BSS в составе IT-ландшафта Оператора связи, а также их вероятностно-временные характеристики и алгоритмы построения эффективной стратегий WFM в реальном времени.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются гетерогенные сети связи пятого поколения. Предмет исследования являются модели и методы управления эксплуатационным персоналом (WorkForce Management) сети связи пятого поколения.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертации является разработка моделей и методов управления эксплуатационным персоналом сети связи, анализ вероятностно-временных характеристик и стратегий построения эффективной WFM в составе IT-ландшафта Оператора связи.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

1. Проанализировать имеющиеся стандарты и рекомендации по построению систем эксплуатационного управления сетями связи.
2. Формализовать подходы к архитектуре WFM в IT-ландшафте сети связи поколения пост-NGN.
3. Разработать математическую модель WFM и получить аналитические оценки вероятностно-временных характеристик (ВВХ) обслуживания обращений (запросов) к эксплуатационному персоналу.

4. Проанализировать имеющиеся работы по математическим моделям оптимизации маршрутов, составления расписаний, поиска кратчайшего пути на графе, статистический анализ, математические методы планирования и т.п.

5. Выполнить анализ ВВХ и рассчитать гарантированное допустимое время выполнения заданий, а также построить обучаемую нейронную сеть анализа отчетов WFM в реальном времени.

6. Разработать рекомендации по синтезу эффективных стратегий организации WFM и провести их экспериментальную проверку.

В диссертации решается **научная задача**, исследования и разработки моделей, методов и стратегий для повышения эффективности управления персоналом операторов связи.

**Научная новизна.** Научная новизна работы состоит в следующем:

- полученная новая трехфазная математическая модель WFM, позволяющая осуществлять управление работой персонала с помощью вероятностно-временных характеристик;

- в рамках решения оптимизационной задачи, позволяющей рассчитать максимально эффективную стратегию WFM по заданным критериям, предложено применение метода множителей Лагранжа, что увеличило производительность персонала на 21%;

- применение разработанного метода линейного программирования позволяет выбирать стратегии управления персоналом на основе заданных ограничений и с учётом ряда ключевых факторов и метрик эффективности, что повысило эффективность управления персоналом на 17%.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в новых математических моделях ВВХ WFM и оптимизации стратегий управления, а также в научном анализе граничных условий,

определяющих организацию выполнения задач в сети операторов связи. Определенную теоретическую значимость имеет также методика расчета, позволяющая оптимизировать расписание рабочих смен и определять необходимое количество персонала для каждой смены с учётом прогнозируемого объёма задач.

**Практическая ценность работы.** Практическая ценность работы состоит в инженерных методах тестирования WFM у операторов связи перспективных телекоммуникационных сетей 4G/5G, которые подтвердили ключевые тезисы, выносимые на защиту. Также практически подтверждена целесообразность применения предложенных методов и моделей в сетях пост-NGN, о чем составлены соответствующие акты внедрения.

**Реализация результатов работы.** Результаты проведенных исследований нашли практическое применение при разработке WFM систем в ПАО «Ростелеком», а также в ряде других научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций в области связи. Документы о внедрении можно найти в Приложении 1 к диссертации.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории оптимизации, а также математической статистики.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Аналитическая трехфазная модель управления персоналом телекоммуникационного оператора (WFM) мультисервисных сетей, включающая фазы планирования работ, выполнения работ, анализа и сохранение в OSS/BSS результатов работ, отличающаяся тем, что позволяет вести расчеты на основе вероятностно-временные характеристик выполнения работ для разных эксплуатационных, пуско-наладочных и профилактических задач на сети.

2. Метод оптимизации выбора стратегии WFM, учитывающий граничное время выполнения работ, вероятность нарушения сроков выполнения работ, интенсивность

поступления запросов, интенсивность обслуживания и с учетом стоимости единицы рабочего времени для сотрудников разной квалификации, позволяющий ускорить до 21% время выполнения работ без изменения численности персонала.

3. Метод линейного программирования, отличающийся тем, что детализирует выбор подхода управления эксплуатационным персоналом с учетом граничных условий, заданных технической политикой оператора связи, для составления планов работ, что позволило, сократить численность персонала до 17% не снижая SLA

**Достоверность результатов.** Степень достоверности основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых ВАК журналах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 27-ой международной конференции «International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications DCCN» (Москва, 23-27 сентября 2024); Международной научно-технической и научно-методической конференции “Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании” АПИНО (Санкт-Петербург, 2021); Трудах учебных заведений связи. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021; на семинарах кафедры инфокоммуникационных систем СПбГУТ.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в SCOPUS и в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций: 1, 2, 16 и 19.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертации получены автором самостоятельно.

# ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМАТИКА WFM В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ СЕТЯМИ СВЯЗИ

## 1.1. Эволюция систем эксплуатации сетей связи

Проблемам технической эксплуатации телефонных сетей общего пользования (ТфОП) и сетей подвижной связи (СПС) ровно столько же лет, сколько самим этим сетям [17]. В силу невозможности изложить здесь полную историю эволюции WFM в эксплуатации телеграфных, телефонных, мобильных, конвергентных, мультисервисных сетей связи, включая значительный объем исследований и множество защищенных диссертаций по их технической эксплуатации сетей связи в 80-х и 90-х годах прошлого века и первых двух десятилетиях XXI века, ограничимся упоминанием того факта, что первая в стране (и единственная в течение многих десятилетий) лаборатория технической эксплуатации городских телефонных сетей OSS/BSS была создана Р.А. Аваковым и А.Л. Малышевым при кафедре нашего университета [16].

Дадим определение двум наиболее распространенным в диссертационной работе (после термина WFM) терминам OSS/BSS. Система поддержки работоспособности OSS и система поддержки бизнеса BSS — это централизованные системы технической эксплуатации/поддержки операторского бизнеса, которые основаны на единой технологии управления сетью связи и включает в себя информационные системы эксплуатации, процессы управления эксплуатацией систем и людей – сотрудников операторской компании, которые взаимодействуют с системами в рамках бизнес-процессов». Как раз входящей в OSS/BSS, согласно этому определению, системе WFM и посвящаются основные исследования диссертационной работы.

Но прежде продолжим рассмотрение материалов TMForum, которые отражают действительно революционные изменения эксплуатационного управления в отрасли телекоммуникаций. Прежде всего, они связаны с более широким применением

информационных технологий [15]. Это и не удивительно, т.к. само развитие телекоммуникационной отрасли, все более и более ориентированной на новые инфокоммуникационные услуги в сфере обработки и передачи информации и новые способы связи, определила и радикальное изменение принципов и подходов к организации технической эксплуатации телекоммуникационных сетей [54].

Этим радикальным изменениям немало поспособствовали и усиливающаяся все эти годы конкуренция на телекоммуникационном рынке, все более высокие требования пользователей к многообразию, функциональным возможностям и качеству телекоммуникационных услуг [7]. Соответственно изменились и требования к WFM. На смену устаревшим *ручным* способам инсталляции и технической эксплуатации оборудования сетей связи пришли *механизация* и *автоматизация*, когда на основе микропроцессоров начали автоматизировать многие стандартные функции обслуживающего персонала.

Отметим, что вопросами стандартизации в области технической эксплуатации телекоммуникаций занимаются несколько различных организаций [105]. В контексте диссертационной работы из них следует выделить Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи ИТУ-Т (International Telecommunication Union – Telecommunication Sector) и Европейский институт стандартизации в телекоммуникациях ETSI. Кроме официальных организаций, существует еще ряд промышленных консорциумов и некоммерческих объединений, которые занимаются разработкой альтернативных документов и соглашений, регламентирующих принципы и технологии построения систем эксплуатационного управления телекоммуникационными сетями и услугами. К числу альтернативных структур можно отнести TMForum, Eurescom, OMG и др.

Наиболее весомый вклад в дело дальнейшего развития технологий управления вносит уже упоминавшийся выше TMForum. Этими же вопросами занимаются и официальные стандартизирующие органы. Лидирующие позиции в тройке

"официальных" организаций занимает ITU. Именно ITU выдвинул в свое время идею технологии TMN (Telecommunications Management Network), которая, несмотря на довольно серьезную критику, остается жизнеспособной по сегодняшний день. В диссертационной работе автор ориентируется последние достижения и перспективные разработки TMForum [80], но считает своим долгом указать на важнейшие для целей этого исследования рекомендации ITU-T по TMN серии M.3000, с которых этой области все начиналось:

- M.3000 series: TMN Overall Principles and Framework,
- M.3100 series: TMN Models and Object Definitions,
- M.3050 series: Enhanced Telecom Operations Map,
- M.3060 series: NGN principles and architecture,

а также на некоторые другие рекомендации, учитываемые в материалах главы 4 диссертационной работы. Дальнейшее развитие этого начального этапа научного направления TMN представлено в документах рабочей группы TISPAN Европейского института ETSI стандартизации в области телекоммуникаций TS 08006: Vision for NGN OSS и DTS 08007: NGN OSS

Упрощенно логическая организация TMN обычно изображается в виде пирамиды, представленной на рис. 1.1 и имеющей пять основных уровней.

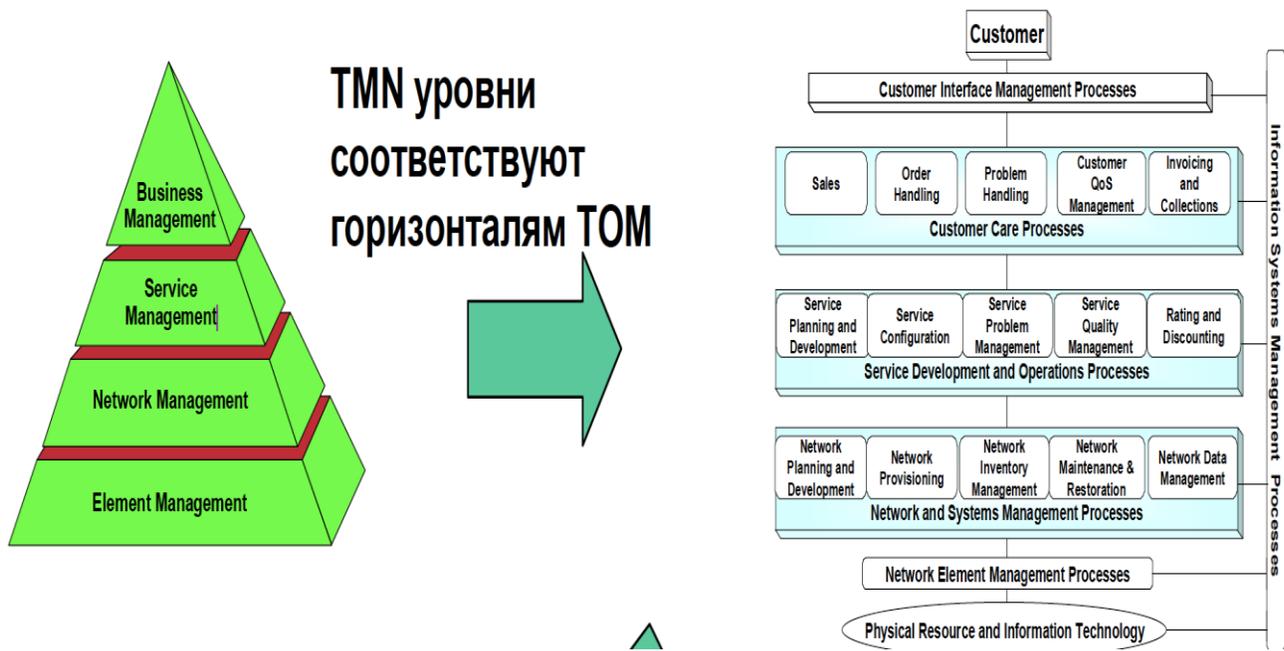


Рис.1.1. Начальный этап эволюции TMN

Переход к сетям связи следующего поколения NGN (Next Generation Network) потребовал дальнейшего развития и концепции TMN в направлениях автоматизации эксплуатационного управления, контроля выполнения соглашения об уровне обслуживания (SLA), мониторинга сети, развития подсистем бизнес-менеджмента, включая и подсистему WFM. Эти требования послужили одной из причин создания некоммерческой организации TM Forum, где и была разработана система взглядов на проблему управления телекоммуникациями, начиная с основных процессов управления телекоммуникационным бизнесом оператора связи и системы поддержки эксплуатации нового поколения (NGOSS).

Методология NGOSS реализована в виде пакета общепринятых в индустрии спецификаций и рекомендаций, которые охватывают важнейшие области деятельности оператора связи, и представляет собой четыре различные, взаимосвязанные между собой компоненты, а именно:

- eТОМ — enhanced Telecom Operations Map - общая схема бизнес-процессов оператора связи для предоставления информационных и коммуникационных услуг, позволяющая всем заинтересованным сторонам в области телекоммуникаций понимать друг друга.
- SID — Shared Information/Data Model - информационная модель, определяющая подход к описанию и использованию данных, задействованных в бизнес-процессах телекоммуникационных компаний. Ее цель – унифицированное представление данных для обмена информацией и ее совместного использования различными подразделениями оператора связи. Она охватывает все стороны деятельности и все стадии жизненного цикла.
- TNA & CID -Technology Neutral Architecture and Contract Interface Definitions - структура интеграции систем, определяющая принципы взаимодействия и интеграции приложений, данных и бизнес-процессов в распределенной среде NGOSS. В ней определяются прикладные программные интерфейсы (Application Programming Interface, API), механизмы связи между системами и другие подобные вопросы.
- Compliance test - система контроля соответствия принципам NGOSS (NGOSS Compliance), позволяющая проверить компоненты NGOSS - решения на соответствие принципам концепции.

Таким образом, провозглашенная TMForum миссия NGOSS [118] - интеграция в единую архитектуру технических и бизнес-аспектов деятельности операторов и провайдеров услуг связи, устранение разрозненности и "лоскутности" автоматизации, построение общей информационной инфраструктуры – сыграла решающую роль в эволюции систем технической эксплуатации телекоммуникаций. (рис.1.2).

## Функциональная Архитектура NGOSS



Рис.1.2. Архитектура NGOSS

Рассмотрим более подробно подсистемы NGOSS системы с точки зрения того, из каких классов решений они состоят.

Mediation Device (уровень сопряжения) позволяет интегрировать OSS/BSS-решения с разнородным активным оборудованием различных производителей. Уровень сопряжения обеспечивает надежное, двустороннее взаимодействие между всеми элементами информационно-технической инфраструктуры вне зависимости от уровня их сложности и степени разнородности, являясь при этом основой построения любой современной системы управления сетью.

Inventory Management (технический учет, ТУ) [50] - это единое хранилище данных о всех аспектах функционирования телекоммуникационной сети, средство для оперативного и эффективного управления инвентаризацией телекоммуникационных

ресурсов компании.

Performance Management (управление производительностью) – этот класс решений улучшает производительность и эффективность работы телекоммуникационных сетей и информационных систем. Решения класса "Performance Management" позволяют оптимизировать конфигурацию сети, оптимально распределить нагрузку между ее ресурсами и обеспечить планирование развития сети.

Fault Management & Trouble Ticketing (регистрация и управление неисправностями) позволяет эффективно управлять процессом поиска и устранения неисправностей. С помощью этого решения можно управлять планами работ, оптимизировать загруженность персонала и контролировать выполнение задач. В Trouble Ticketing подбирается, систематизируется и хранится информация о каждой возникшей проблеме, о способах и этапах ее решения, о текущем состоянии дел. Fault management обеспечивает двухстороннее взаимодействие с автономными системами управления активным оборудованием различных поставщиков, что позволяет создать интегрированную систему управления с использованием решений для HelpDesk и CRM, существенно упростить управление телекоммуникационными ресурсами компании и их обслуживание.

Order Management (управление заказами) применяется для поддержки бизнес-процессов любого типа телекоммуникационных услуг: фиксированная связь, передача данных, беспроводная связь, IP и интегрированные речевые услуги. Система отслеживает все этапы исполнения заказа на протяжении всего его жизненного цикла. Одновременно она позволяет создавать детальные отчеты по каждому этапу выполнения заказа, а также по процессу обработки заказов в целом.

Fraud Management (борьба с мошенничеством) предназначена для обнаружения, пресечения и упреждения случаев несанкционированного доступа к ресурсам оператора связи. Система отслеживает нарушителя с помощью механизмов, специально разработанных для различных типов соединений и услуг, и реагирует в

случае вызова подозрительного номера, несуществующего пользователя, вызова с превышением порога стоимости или продолжительности, а также в случае несанкционированного доступа к услугам. Комплексная система по борьбе с мошенничеством не только своевременно информирует оператора о запросе недобросовестного клиента, но и способствует выявлению закономерностей в действиях мошенников. Это решение позволяет выработать механизм защиты от мошенничества, а также оптимально распределить задачи между аналитиками и другим персоналом компании. В условиях взаимодействия Fraud Management с CRM-системой обнаружить и предотвратить мошенничество удастся в самые короткие сроки.

SLA management (управление уровнем обслуживания) обеспечивает компании максимальный доход за счет оперативного мониторинга информационных сервисов, предоставляемых внешним и внутренним пользователям. Объективный и своевременный контроль качества услуг избавляет оператора от выплаты компенсаций клиентам в связи с нарушением SLA (Service Level Agreement).

Network & Service Provisioning Management (управление планированием и развитием услуг) прогнозирует различные пути развития событий и выполняет моделирование разнообразных сценариев типа "что, если?" чтобы добиться максимально возможной степени готовности услуги, перед тем как начать ее предоставление клиентам.

WorkForce Management (управление персоналом) [10] позволяет эффективно управлять различными командами сотрудников, которые территориально распределены и обслуживают большое число клиентов, обеспечивает коммуникации между всеми участниками процесса предоставления услуг, мониторинг и составление отчетов в режиме реального времени. Благодаря интеграции WFM с другими OSS/BSS-решениями у руководства телекоммуникационной компании предприятия открывается возможность управлять планами работ, автоматически распределять задачи по

исполнителям и гибким образом определять менеджеров и членов групп технического обслуживания.

## 1.2. Актуальные аспекты архитектуры ODA и интеграция WFM в OSS/BSS

Важнейшей архитектурой для интеграции WFM с другими OSS/BSS-решениями становится ODA, являющаяся в этом смысле следующим шагом развития архитектур NGOSS/Frameworkx. [89]

ODA предлагает свой набор инструментов и подходов (рис. 1.3) для разработки и внедрения IT-систем. Вот эти инструменты: функциональная архитектура бизнес-функций (Functional Architecture, FA), функциональная структура программных приложений, информационная модель SID, прикладные программные интерфейсы (API) для организации взаимодействия между компонентами ODA (ODA Component) и программными платформами.

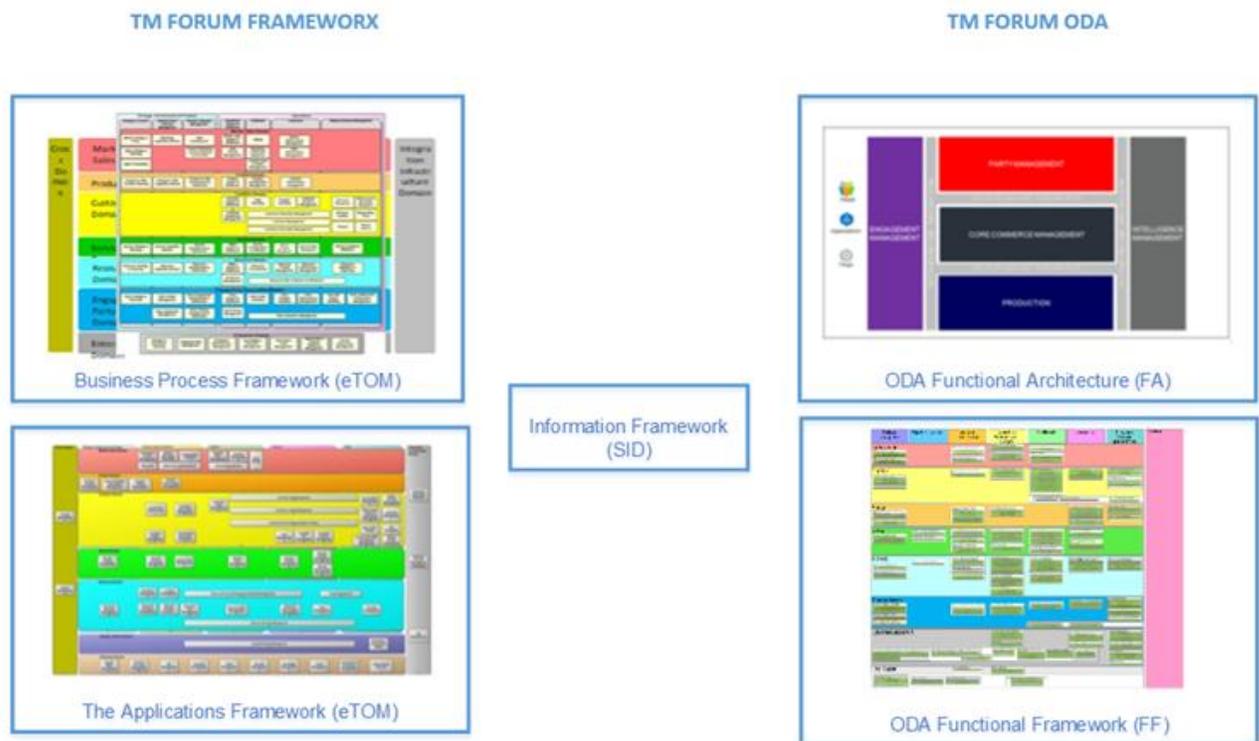


Рис. 1.3. Инструменты Frameworkx и ODA.

Предыдущие разработки – концепции NGOSS/Frameworkx были ориентированы исключительно на автоматизацию операторов связи. В силу того, что инфокоммуникации зашли глубоко во все сферы человеческой деятельности, теперь потребовалось переработать архитектуру с тем, чтобы она удовлетворяла любой другой сфере, где предоставляются цифровые услуги. В основу FA заложен ряд принципов TOGAF, представленных четырьмя группировками: Business Principles, Information & Data Principles, Application Principles, Technology Principles [137]. Согласование с TOGAF – это определённо шаг в сторону универсальности: новая архитектура сможет применяться не только для построения решений для сферы инфокоммуникаций, но и для любой другой – там, где вообще присутствуют цифровые услуги и их поставка (рис. 1.4).

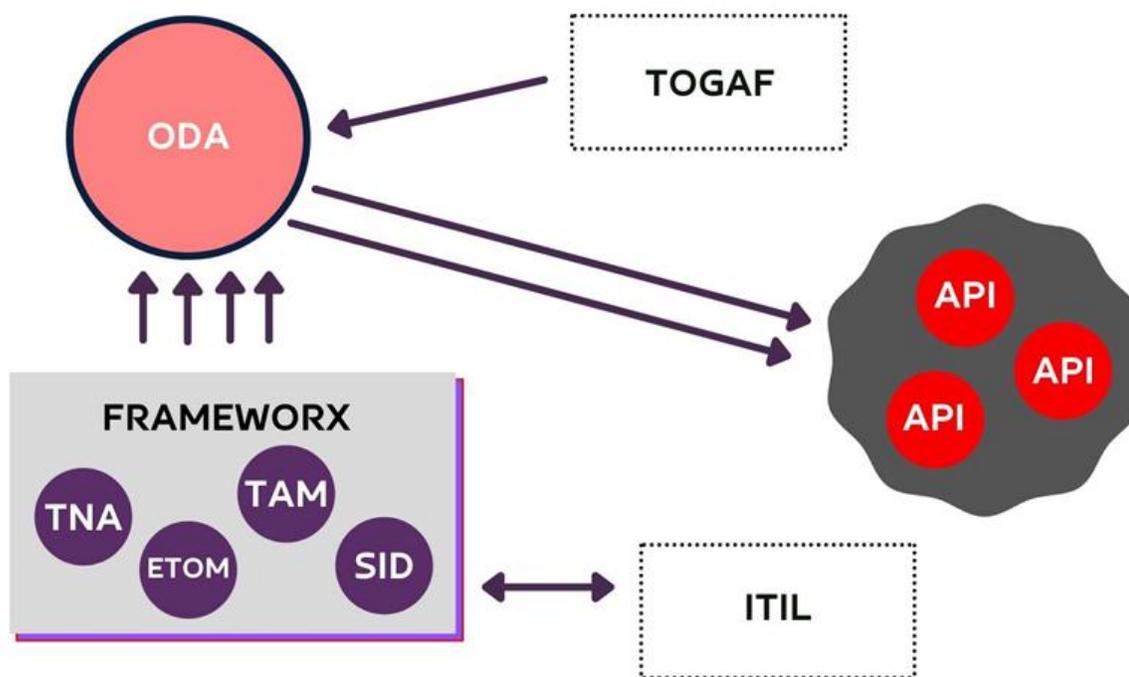


Рис. 1.4. Взаимосвязь ODA, TOGAF и Frameworkx

### 1.2.1. Функциональная архитектура ODA

Каждый из блоков ODA FA (рис. 1.5) представляет собой группировки бизнес-функций, непрерывно выполняемых внутри предприятия для реализации его бизнес-

задач.



Рис. 1.5. Функциональная архитектура ODA - представление высокого уровня (уровень 0)

Блок управления взаимодействием (Engagement Management) содержит бизнес-функции (БФ), отвечающие за взаимодействие с клиентами (пользователями), заказчиками, партнёрами, поставщиками, а также за взаимодействия внутри предприятия между работниками и процессами. Например, управление личным кабинетом пользователя, управление пользовательским опытом, организация доступа к контенту и управление им, управление пользовательским интерфейсом, авторизация и аутентификация пользователей и другие.

Блок управления взаимодействиями с партнёрами (Party Management, PM) содержит БФ, реализующие взаимодействия с поставщиками или партнёрами – со всеми, кто вовлечён в бизнес-взаимодействие с предприятием. БФ этого блока частично совпадают с БФ горизонтального домена «Поставщик/Партнёр» карты eTOM. При этом эти БФ собраны из разных «вертикалей» карты.

Блок управления бизнесом (Core Commerce Management) содержит БФ, приводящие к непосредственному получению прибыли. Многие БФ перенесены сюда непосредственно из горизонтальных доменов «Рынок/Продажи», «Продукт», «Клиент», «Партнёр» карты eTOM. Например, управление предложением и

продуктовым портфелем (Product Offerings and Products Catalogue Management), управление заказами (Order Handling) и другие.

Производственный блок (Production) отвечает за подготовку и управление жизненным циклом служб клиентского и ресурсного обслуживания независимо от типа технологии (например, физической, виртуальной, проверки технической возможности подключения и т. д.). В рамки Производственного блока входят БФ создания, доставки, использования, поддержки, гарантирования работоспособности продуктов у заказчика. Он обеспечивает комплексное управление эксплуатационными функциями для служб, сервисов и ресурсов. Если сказать коротко, то этот блок наделён БФ создания инфраструктуры, поддержки готовности инфраструктуры и продуктов компании. Аналогично предыдущим блокам, БФ этого блока частично «перекочевали» из доменов «Услуга» и «Ресурс» (на пересечении с вертикалью «Эксплуатация ресурсов и Поддержка готовности» (RM&O Support & Readiness) карты eTOM.

Блок интеллектуального управления (Intelligence Management) содержит БФ, отобранные из разных доменов карты eTOM – те БФ, которые так или иначе отвечают за всякого рода аналитику по отношению к бизнес-процессам, оборудованию или поддержке принятия решений. В частности, в этот блок собраны такие группировки БФ, как анализ результатов продаж (Sales Performance Management), оценка производительности продукта (Product Performance Management), управление качеством услуг (Service Quality Management), управление производительностью (Resource Performance Management) и другие.

С учётом написанного выше [102], можно сделать промежуточный вывод, что многие БФ ODA взяты из eTOM, при этом он перераспределены по новым принципам, нежели чем в eTOM.

### **1.2.2. Структура программных приложений ODA**

Структура приложений FF представляет собой карту функций программного

обеспечения, поддерживающего бизнес-процессы поставщика цифровых услуг. Он иерархические группы, структурированные на основе горизонтальных доменов по принципу карт eTOM и TAM Framework. Другими словами, FF — это функционально ориентированная система библиотек. Она описывает автоматизирующие функции поставщика услуг. Функция из FF является базовым строительным блоком программного ODA-компонента.

Разработка приложений для автоматизации на основе ODA-компонент — принципиально отличает подход ODA от подхода Framework [99]. Последний, как известно описывал принципы и подходы к разработке OSS/BSS, которые, по сути, упраздняются в новой концепции. FF сильно перекликается с картой TAM и практически имеет тот же смысл с точки зрения жизненного цикла разработки IT-решения.

К вопросам эффективности ODA по сравнению NGOSS/Framework для реализации разработанных в главах 2 и 3 теоретических моделей WFM мы вернемся в главе 4, а в этой главе перейдем к более узкому рассмотрению проблематики WFM.

### **1.3. Эволюция управления персоналом WFM**

Подсистема WFM является самой древней из подсистем, входящих NGOSS/BSS. Разве что биллинг может сравниться с WFM в этом. До самого последнего времени пирамида Хеопса была самым большим построенным людьми техническим сооружением на планете, а возраст египетских пирамид составляет 3-4 тысячи лет.

Из школьного курса истории Древнего мира мы вынесли, что пирамиды возводили рабы, служившие жестоким фараонам. Но совсем недавно ученые-египтологи доказали, что это не так. Проведенные в последнее время раскопки показали, что строительством пирамид занимались предположительно не рабы, а свободные люди. Для строителей были специально построены города рядом с пирамидами, где для персонала были организованы комфортные по тем временам

жилье, медицинское обслуживание, хорошее питание, мастерские, пекарни, кладбище, склады, магазины одежды, пивоварни. В компании по сооружению пирамиды Хеопса работали от 10 до 20 тысяч человек, распределенные в бригады из 2 тысяч человек, которые делились на 2 команды по 1 тысяче человек, а каждая команда в свою очередь состояла из 5 групп (так называемых *фил*), как показано на рис. 1.6. Филы делились на группы по 20 человек, работающих посменно. Смена сотрудников транспортного цеха (самая трудоемкая работа по транспортировке каменных блоков) длилась всего 4 часа. Для персонала других специальностей (каменотесов, писцов, надсмотрщиков, учетчиков, хранителей документов, управляющих) были другие графики. Численность персонала изменялась в соответствии с заранее рассчитанным проектом.

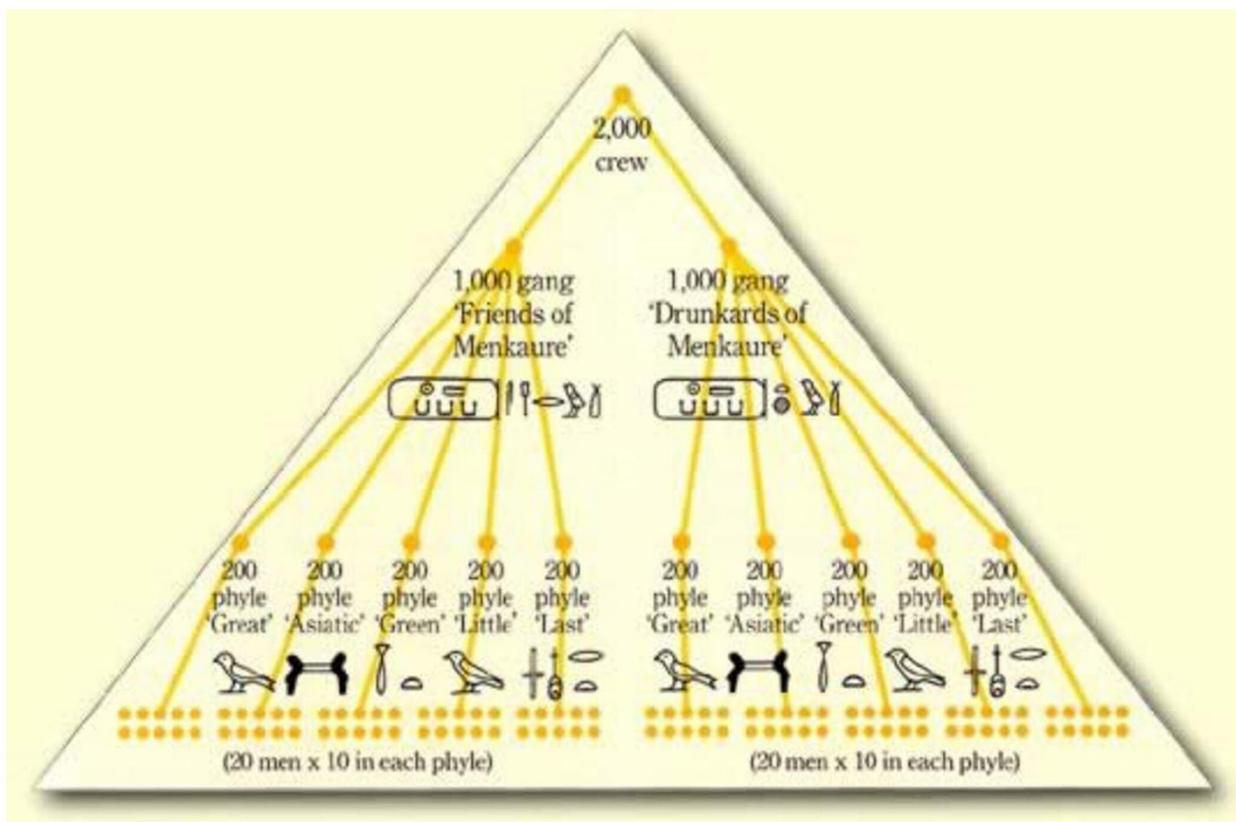


Рис.1.6. Математическая модель WFM первого поколения

В Вавилоне в законах царя Хаммурапи (1792–1750 гг. до н. э.) были установлены нормы WFM, юридически оформлены вопросы минимальной заработной платы, контроля и ответственности персонала. В Древнем Китае две тысячи лет тому назад в

специально созданной академии проводилась специализированная подготовка менеджеров WFM, а Аристотель в Древней Греции теоретически разработал и описал некоторые действующие и сегодня принципы, методы и традиции в области управления персоналом.

В средние века, когда торговля и промышленность стали сосредоточиваться в городах, уникальный опыт WFM был создан так называемыми *цехами*. В те времена цех был не только производственным объединением, но и сложнейший социальный организм, как правило, со своим городским кварталом, храмом, гербом, гимном.

Промышленная революция в Англии в середине XVIII в. Привела к возникновению WFM фабричной системы, предполагающей совместную работу значительного числа наемных рабочих, заменивших гораздо более квалифицированный труд ремесленников городских цехов. Развитие этих идей до классической модели WFM крупного машинного производства, ориентированного на массовый выпуск продукции, привело к знаменитому автомобильному конвейеру Генри Форда.

Практически в это же время начали зарождаться научные основы WFM.

Первые научные основы управления персоналом появились в 1800-х годах в работах Чарльза Бэббиджа и Роберта Оуэна, но основоположником науки WFM можно по праву считать Фредерика Уинслоу Тейлора, который разработал систему знаний о законах рациональной организации труда и назвал ее наукой управления персоналом.

Следует отметить также Генри Ганта, создавшего основы премиальной системы в WFM, супругов Фрэнка и Лилиан Гилбрет, автора теории административного управления Анри Файоля, автора теории бюрократического управления Макса Вебера, автора книги «Двенадцать принципов производительности» Гаррингтона Эмерсона и других классиков - основателей науки WFM.

Исследования WFM проводились и в России. Так в 1812 году профессор

Харьковского университета Людвиг Кондратьевич Якоб рассчитал сравнительные издержки WFM при найме вольного работника и крепостного, выразив их в натуральных единицах: пудах и четвертях ржи. В расчетах он использовал понятие «недополученный», или «упущенный», доход. Ему же принадлежит критикующее крепостное право сочинение «О сравнительной выгодности крепостного права и вольнонаёмного труда, за которое ему была вручена большая золотую медаль в 100 червонцев Императорским экономическим обществом. К сожалению, это сочинение не было полностью воспринято ни его современниками, ни организаторами колхозов более века спустя.

Начала современной науки WFM были заложены несколько позже - в 50–60-е годы XX века, когда начались технологическая реконструкция производства, внедрение вычислительной, возникновение новых отраслей. Это обусловило потребность в кадрах высокой квалификации, а также необходимость пересмотра подходов к WFM.

Необходимую научную базу этих процессов обеспечили теории «человеческих ресурсов», начало которой было положено книгой «Человеческая сторона предприятия» Д. Макгрегора, опубликованной в 1960 году. Наиболее известны и до сих пор часто цитируются работы в этом направлении труды А. Маслоу (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Пирамида Маслоу

В целом же к началу XXI веков созданы теоретические основы WFM в виде трех классов теорий: классических теорий, теорий «человеческих отношений» и теорий «человеческих ресурсов». Сегодня стало очевидным, что конкурентность предприятия и более того - эффективность развития экономики современного государства в огромной степени зависит от человеческого капитала. от того, сколько средств оно вкладывает в своих людей. За разработку теории человеческого капитала были присуждены две Нобелевские премии в области экономики — Теодору Шульцу в 1979 г. и Гэри Беккеру в 1992 г. Человеческий капитал — это имеющийся у каждого запас знаний, навыков, мотиваций [140]. Инвестициями в него могут быть образование, накопление профессионального опыта, охрана здоровья, географическая мобильность, поиск информации. Первоначальные интересы исследователя заключались в оценке экономической отдачи от образования. Беккер первым осуществил статистически корректный подсчет экономической эффективности образования.

Последние годы привнесли немало нового в науку WFM (рис.1.8). Прежде всего это развитие аутсорсинга в самых разных сферах, а также «уберизация» (от слова Uber) управления персоналом. Значительное влияние на WFM оказал COVID 19. Эти тренды нашли свое отражение в материалах глав 2 – 4. Но прежде выделим специфические особенности WFM в телекоммуникациях.

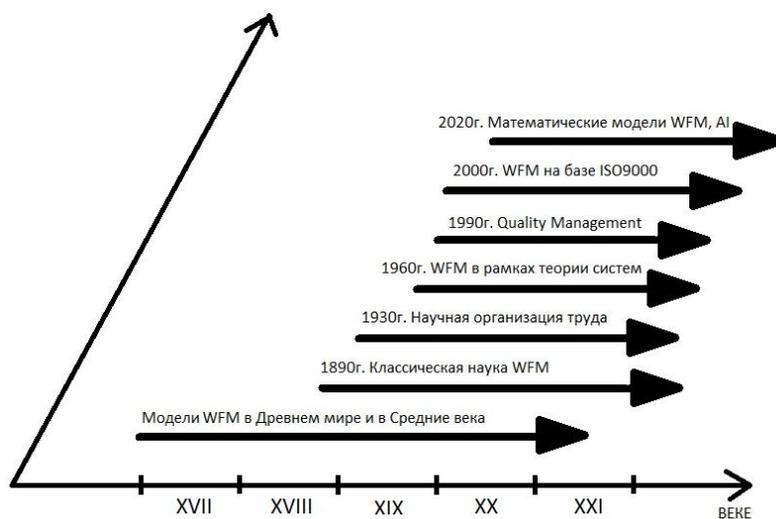


Рис. 1.8. Научные подходы к WFM

## 1.4 WFM в IT-ландшафте телекоммуникационной компании и математические модели WFM

Подчеркнем принципиальное отличие WFM оператора связи от основной массы систем управления персоналом в строительстве, промышленности, транспорте, торговле и др. *Целевая функция WFM в телекоммуникациях, критерий его эффективности не в создании материальных ресурсов (производство), не в передвижении материальных продуктов (транспорт, логистика), не в распределении и перераспределении их (складирование, хранение, торговля).*

Ресурсы телефонной сети Оператором связи не производятся, не транспортируются, не продаются, а используются для предоставления инфокоммуникационных сервисов с заданным SLA (Service Level Agreement) качеством. Следовательно, совсем другие KPI (ключевые показатели эффективности, англ. Key Performance Indicators) задаются для WFM оператора связи, совсем другие критерии оптимизации управления персоналом.

Минимаксные оптимизационные задачи, методы линейного программирования, математические модели расчета и прогнозирования численности персонала с целью максимизации производства в штуках, перевозки в тонно-километрах, строительства в квадратных метрах, продаж в рублях и т. п. здесь не работают. Для WFM в составе OSS/BSS телекоммуникационной компании робастным является совсем другой подход – вероятностный, имеют место другие критерии: функции распределения задержек в предоставлении инфокоммуникационных услуг, длительность наработки на отказ, вероятности потерь и т. п. То есть критерии, важные именно для телекоммуникационных сетей, для правильной организации их технической эксплуатации и развития сетей.

Поэтому вполне естественно, что проблемам технической эксплуатации телефонных сетей общего пользования (ТфОП) и сетей подвижной связи (СПС) равно

столько же лет, сколько самим этим сетям [53]. Разумеется, полная история эволюции WFM (весьма фрагментарно изложенная выше) несоизмерима с эволюцией специализированных систем WFM для эксплуатации телеграфных, телефонных, мобильных, конвергентных, мультисервисных сетей связи. Последним включая значительный объем исследований и несколько защищенных диссертаций по технической эксплуатации сетей связи в 80-х и 90-х годах прошлого века и первых двух десятилетий XXI века. ограничимся упоминанием того факта, что первая в стране (и единственная в течение долгого времени) лаборатория технической эксплуатации городских телефонных сетей OSS/BSS была создана в нашем университете на кафедре Р.А. Авакова, а первым ее заведующим был А.Л. Малышев.

Сегодня для современных инфокоммуникационных операторов/провайдеров с учетом принципиально новых телекоммуникационных сервисов и технологий дело обстоит несколько иначе: задержки в выполнении текущих задач WFM, качество и надежность инсталляций и эксплуатационного сопровождения инфокоммуникационных услуг определяют выполнение или невыполнение SLA, а следовательно – эффективность функционирования сети Оператора связи и его конкурентоспособность на сегодняшнем и завтрашнем телекоммуникационном рынке.

К исследованию вероятностно-временных характеристик WFM Оператора связи мы вернемся в следующей главе, а здесь опишем некоторые наиболее близкие к нашей тематике математические модели WFM.

Из вышеизложенного следует, что ключевым элементом телекоммуникационной компании остается человек - либо как лицо, принимающее решения, либо как оператор системы, что в обоих случаях требует глубоких профессиональных знаний, интеллекта и опыта. В связи с этим целью настоящего раздела является решение проблемы планирования и расчета ресурсов WFM, а также методов и алгоритмов управления этими человеческими ресурсами.

В формальном плане мы рассматриваем проблему, когда в начальный момент

времени функционирования Оператора связи  $m$  сотрудников  $i = 1, \dots, m$  со 100%-ной загрузкой. Эти сотрудники должны обработать  $n$  независимых заданий  $j = 1, \dots, n$ . Каждый сотрудник может выполнять одно задание в данный момент времени, и прерывание обработки задания не допускается. Согласно традиционному определению [122], время обработки  $t_{ij}$  представляет собой базовое время, в течение которого задание  $j$  должно быть обработано работником  $i$ .

## 1.5 Цель и задачи исследования

Из вышеизложенного следует, что управление персоналом WFM оператора мультисервисной телекоммуникационной сети в современных условиях приобретает все более и более важное значение. По сравнению с рутинным распределением заявок между телефонными монтерами бюро ремонта сетей фиксированной телефонной связи прошлого века современная система WFM оперирует несоизмеримо большими наборами выполняемых функций, широким спектром профессиональных компетенций и ключевых показателей эффективности (KPI).

В партнерстве с WFM выступают другие новые средства информационных технологий (IT-ландшафта) телекоммуникационного оператора, элементы BSS (Business Support Systems), программное обеспечение учета человеческих ресурсов (HR), системы планирование ресурсов предприятия (ERP), другие средства планирования рабочей силы и управления отпусками сотрудников, хронометраж базовых инженерных операций на объектах оператора и в помещениях заказчиков и другие вспомогательные средства для оптимизации выполнения персоналом требуемых работ, повышения производительности и снижения затрат.

На рис.1.9 представлено взаимодействие WFM с другими системами IT-ландшафта, через которые данные извлекаются, переформатируются, позволяют вычислять значения, принимать решения, создавать или квалифицировать записи и т.п.

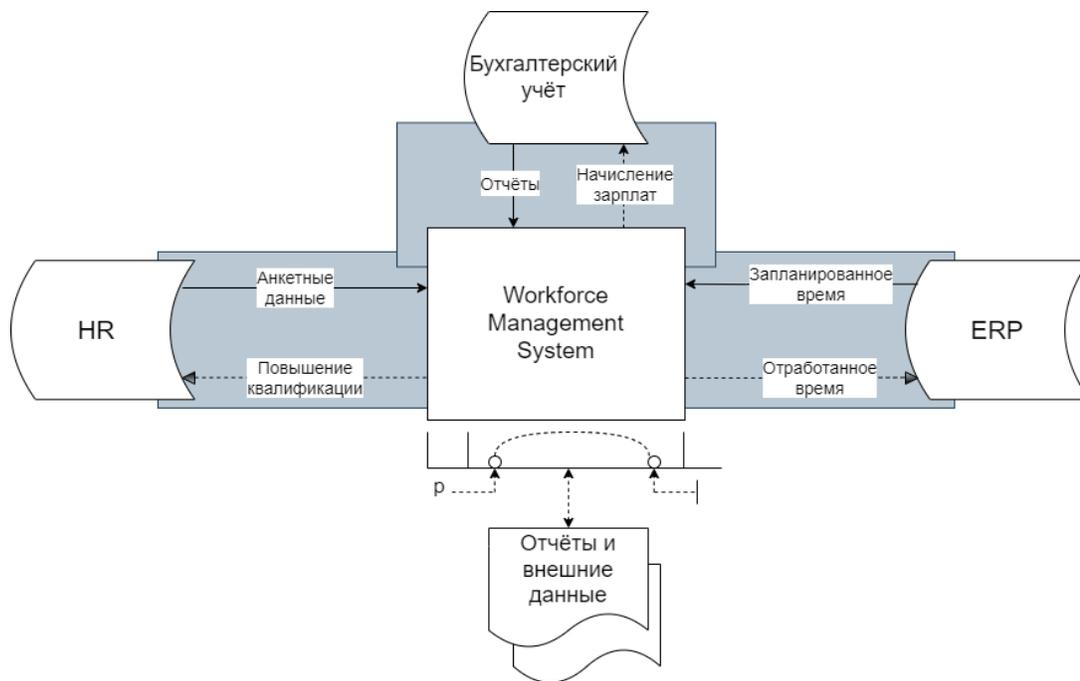


Рис. 1.9. Интерфейсы WFM в IT-ландшафте оператора связи

Как видно на рис.1.9, имплементация современной системы WFM в IT-ландшафт оператора связи, интеграции данных с другими подсистемами OSS/BSS в архитектуре ODA [96], обмен данными с системами планирование ресурсов компании ERP, человеческих ресурсов HR, расчета заработной платы и др. являются обязательными. Синхронизация WFM со всеми этими системами уменьшает количество ошибок ручного ввода данных, значительно сокращает время, необходимое для обмена, загрузки или извлечения данных, упрощает и ускоряет обновления и повышает производительность управления современными инфокоммуникациями.

Задача автоматизации управления персоналом неизменно встает перед оператором связи, когда количество сотрудников и задач к выполнению становится таким, что «ручное» управление становится затруднительным или даже невозможным. Кроме того, инфокоммуникации XXI века накладывают на WFM новые задачи, совсем не характерные для традиционных ТфОП века прошлого. Во-первых, реальность сегодняшних телекоммуникаций заключается в том, что квалифицированные инженеры компании представляет собой нечто большее, чем человеческие ресурсы, и

большее, чем человеческий капитал, - они представляют собой критически важный, интеллектуальный актив Оператора, совокупность как материальных, так и нематериальных средств создания современной инфокоммуникационной сети.

Во-вторых, что не менее важно, это растущие затраты на поиск, обучение, содержание, обеспечение улучшенных условий работы нужных для Оператора специалистов, а также оптимизацию их загрузки и максимизация эффективности отдачи.

И, в-третьих, растущая «мультисервисность» сетей NGN и пост-NGN, расширение перечня всевозможных OTT-сервисов, Интернет вещей, частные сети поколений LTE и 5G [2]. радикально по расширили нормативные и договорные обязательства по эксплуатации таких сетей, усилили требования к управлению рисками при их функционировании, а, следовательно, потребовали более продвинутых современных моделей и методов WFM.

В связи с этим возникла потребность научного анализа моделей и методов WFM телекоммуникационной компании, решения методологических и технических вопросов построения эффективной архитектуры WFM. Одной из составных частей этого анализа является настоящая диссертация.

*Соответственно, цель диссертации заключается в разработке моделей и методов управления эксплуатационным персоналом сети связи, в исследовании вероятностно-временных характеристик и стратегий построения эффективной WFM в составе IT-ландшафта Оператора связи.*

Отсюда вытекает актуальность следующих решаемых в диссертационной работе задач, соответствующих сформулированной выше цели исследования:

*1. Формализовать подходы к архитектуре WFM в IT-ландшафте сети связи поколения пост-NGN.*

*2. Разработать трехфазную математическую модель WFM и получить*

*аналитические оценки вероятностно-временных характеристик (ВВХ) обслуживания обращений (запросов) к эксплуатационному персоналу.*

*3. Выполнить анализ ВВХ и рассчитать гарантированное допустимое время  $\tau_g$  выполнения заданий, а также построить обучаемую нейронную сеть анализа отчетов WFM в реальном времени.*

*4. Решить оптимизационную задачу по выбору экономически эффективных, удовлетворяющих параметрам SLA, стратегий организации WFM.*

*5. Разработать инженерные рекомендации по синтезу эффективных стратегий организации WFM и провести их экспериментальную проверку.*

В качестве основных методов анализа в диссертационной работе выбраны вероятностные методы теории массового обслуживания, математические методы исследования операций, множители Лагранжа, машинное обучение и некоторые другие методы. Детальный анализ этих работ приводится в главах 2 и 3 в связи с разработанными в диссертации математическими моделями и методами.

## **Выводы главы 1**

1. Анализ тенденций эволюции мультисервисных сетей связи поколений 5/6G показал, что соответствующее усложнение эксплуатационного управления этими сетями привело к резкому усложнению задач WFM и вызвало целесообразность разработки новых математических моделей WFM.
2. Рассмотрена эволюция WFM на разных этапах индустриального развития цивилизации. Выявлены специфические особенности WFM в телекоммуникациях, обуславливающие принципиально новые подходы к математическим моделям этих систем.
3. Показано, что приведенные в данной главе качественные рассуждения требуют также более строгого, формализованного количественного

анализа, в связи с чем в условиях практического отсутствия опубликованных научно обоснованных результатов необходима разработка новых моделей вероятностно-временных характеристик WFM.

4. Исследованы архитектуры NGOSS/Framework/ODA в качестве основы интеграции WFM в IT-ландшафт телекоммуникационной компании.
5. Обоснована важность и актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ WFM ОПЕРАТОРА СВЯЗИ

### 2.1. Эволюция математических моделей управления сетью

Качественные рассуждения в предыдущей главе требуют и более строгого, формализованного количественного анализа, чему и посвящена данная глава и, в значительной степени, вся эта диссертационная работа.

Традиционно основными вероятностно-временными характеристиками эксплуатационного управления сетей связи считались следующие две: интенсивность потока заявок к эксплуатационному персоналу сети  $\lambda$  и интенсивность обслуживания этих заявок  $\mu$ . [4]

Под интенсивностью потока заявок к эксплуатационному персоналу  $\lambda$  (1/час) понимается количество заявок в единицу времени к инженерным службам операторской компании на ремонт, инсталляцию, модернизацию телекоммуникационного оборудования.

В контексте данной статьи [4] важно подчеркнуть, что интенсивность потока этих заявок никогда не являлась постоянной. Нестационарность потока заявок на обслуживание обуславливалась теми или иными ситуациями в инфокоммуникационной сети: регулярные ремонтные и профилактические работы, ввод новых коммутационных узлов и станций и соответствующие пуско-наладочные работы, прокладка и модернизация линейно-кабельных сооружений, строительство базовых станций, ввод в эксплуатацию новых сервисов и т. п.

Это же можно сказать относительно времени обслуживания заказов инженерным персоналом телекоммуникационного оператора. Время обслуживания одного требования  $T_{об}$  – случайная величина, которая может изменяться в большом диапазоне. Как и любая другая случайная величина,  $T_{об}$  полностью характеризуется законом

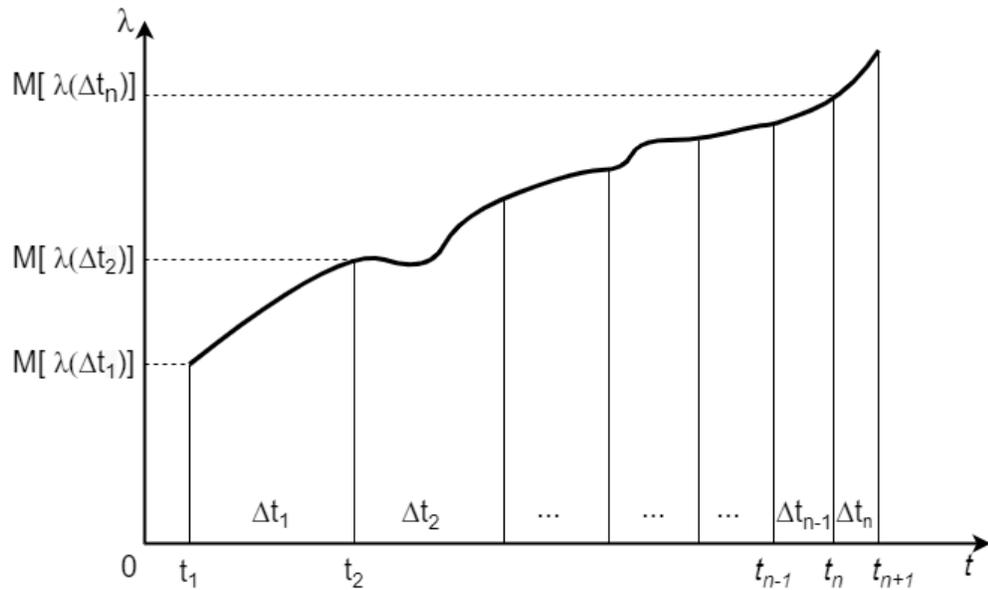
распределения. На практике чаще всего принимают гипотезу об экспоненциальном законе распределения времени обслуживания, который имеет место тогда, когда плотность распределения резко убывает с возрастанием времени  $t$ , или гипотезу о нормальном законе распределения этого времени. Например, когда основная масса требований обслуживается быстро, а продолжительное обслуживание встречается редко, гипотеза об экспоненциальном законе распределения времени обслуживания вполне приемлема, а тогда вероятность события, что время обслуживания продлится не более чем  $t$ , равна

$$P_{об}(t) = 1 - e^{-\mu t}.$$

Среднее время обслуживания  $1/\mu$  – одна из важнейших характеристик обслуживающих приборов, которая определяет пропускную способность всей системы.

Коэффициент загрузки инженерного персонала требованиями  $r$  – важнейший параметр WFM телекоммуникационного оператора, определяющий величину  $\mu$ . При увеличении коэффициента загрузки инженерного персонала  $r$  уменьшаются затраты на техническое обслуживание сети, но, одновременно, ухудшаются качественные показатели, а значит и конкурентность оператора. Оптимальное управление работой персонала позволяет сократить затраты и не ухудшать качественные показатели [66].

Расчет численности эксплуатационного персонала и организация работ бюро ремонта (определение величины  $\mu$ ) осуществлялось для определенных интервалов времени эксплуатации сети связи, в пределах которого можно принять параметр потока  $\lambda$  постоянным. На рис.2 показана непрерывная функция потока  $\lambda(t) \geq 0$ , среднее значение которой можно считать постоянным на достаточно больших отрезках временной оси  $[t_n, t_{n+1}]$ .



**Рис. 2.1. Разбиение функции потока требований на интервалы**

Проблема заключается в величине этих отрезков, т.е. длительности интервалов  $[t_n, t_{n+1}]$ , на которых значения  $\lambda(t)$  можно считать фиксированными. В давние времена, в эпоху телефонной сети общего пользования (ТфОП), когда срок жизни АТС рассчитывался на 20+лет, этот период составлял 10 - 15 лет исходя плана развития сети связи. С появлением мобильной связи и dial-up доступа в Интернет этот интервал сократился до 2 – 3 лет, а в настоящее время при переходе к сетям 4G/5G он вообще измеряется не годами, а месяцами. [40]

Опишем эту проблему несколько более формализовано. Фигуры, ограниченные графиком функции  $\lambda(t)$ , осью абсцисс и параллельными оси ординат прямыми  $t_1, t_2, \dots, t_n$  (рис.2.1), представляют собой криволинейные трапеции. С геометрической точки зрения определенные интегралы от неотрицательной функции  $\lambda(t)$  в интервалах  $[t_n, t_{n+1}]$  численно равны площадям этих криволинейных трапеций. Нам необходимо принять значение потока на каждом отрезке постоянным и равным математическому ожиданию  $\lambda_n$  функции потока  $\lambda(t)$  на интервале  $[t_n, t_{n+1}]$ . Достоверность  $\Delta$  такого предположения определяется разностью площади прямоугольника с основанием  $t_{n+1}-t_n$  на рис.2.1 и площади криволинейной трапеции с тем же основанием, задаваемой определенным

интегралом

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \lambda(t) dt$$

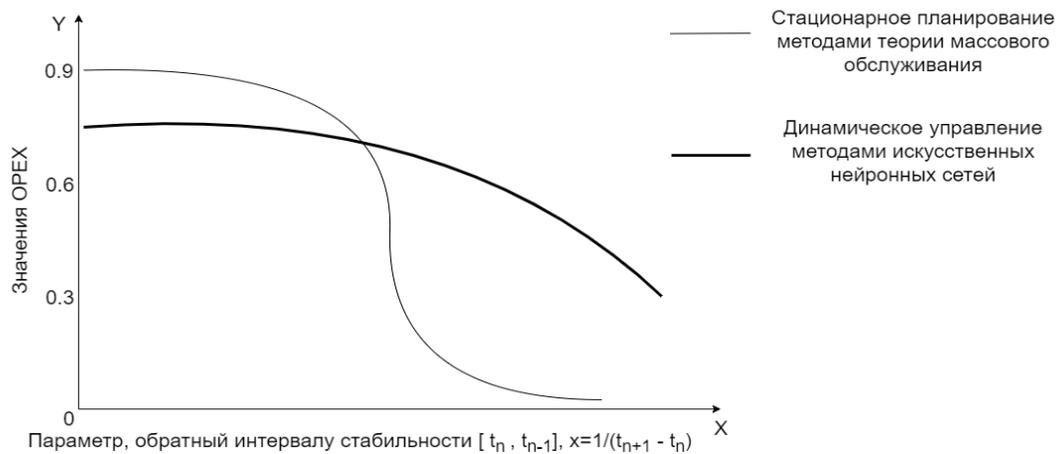
С математической точки зрения достоверность принимаемых решений определяется разностью между площадями криволинейных трапеций и площадью ступенчатой фигуры на рис. 2.1, что в свою очередь зависит от количества интервалов разбиения  $n$ , скорее всего, неравных отрезков. Очевидно, что отрезки разбиения выбираются такими, чтобы в пределах каждого отрезка можно было приближено считать параметр потока постоянным с учетом вида графика функции потока  $\lambda(t)$  на рис.2.1.

Именно эта неравномерность интервалов  $[t_n, t_{n+1}]$ , значения которых менялись от одного – двух десятков лет в эпоху ТфОП до одного – двух месяцев при переходе к 5G, обсуждалась выше.

Рассмотрим ре(э)волюцию математических моделей и методов построения IT-ландшафта телекоммуникационной компании включая WFM [53], которая вызвана этими процессами перехода к сетям 5G и, в частности, понижением на порядок длительностей интервалов  $[t_n, t_{n+1}]$ .

На рис. 2.2 представлены два подхода к организации управлениями инфокоммуникациями, которые мы с известной степенью условности можем определить как стационарное планирование методами теории массового обслуживания (линия 1) и динамическое управление методами искусственных нейронных сетей (линия 2). Оба эти подхода в той или иной пропорции сегодня присутствуют в управлении сетями связи. Баланс между этими двумя подходами меняется именно таким образом по мере роста параметра  $x$ , обратный интервалу стабильности  $[t_n, t_{n+1}]$ , то есть  $x=1/(t_{n+1} - t_n)$ , по новому увеличивающийся каждый раз по мере усложнения операционного управления на очередном этапе развития

инфокоммуникаций [11], как показано на рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Сдвиг парадигмы управления процессами WFM**

По мере усложнения сетей и перехода к гетерогенным сетям пятого поколения эффективность стационарного планирования управления сетью в целом [13], и WFM, в частности, постепенно снижается в то время, как новые подходы динамического управления, базирующиеся, в частности, на искусственных нейронных сетях, представляются весьма перспективными, что подробнее обсуждается ниже в главах 3 и 4.

Но прежде рассмотрим предлагаемый в диссертации подход к расчету вероятностно-временных характеристик WFM.

## 2.2. Трехфазная математическая модель WFM

Заметим, что в области WFM сегодня работает ряд компаний, занимающихся разработкой программного обеспечения. Публикуется много материалов по практическим инженерным методам WFM с использованием моделей искусственного интеллекта, глубокого машинного обучения, нейронных сетей, других рабочих методов компьютерных наук [132, 133]. Кое-что из таких методов предполагается рассмотреть в заключительном параграфе этой главы.

Главная задача этого раздела иная. Она заключается в исследовании и разработке

математической модели вероятностно-временных характеристик процессов WFM для суперсложных высокотехнологичных задач, которыми занимаются системы WFM телекоммуникационных операторов. Подобным исследованиям и математическим моделям также посвящены много публикаций. Там рассматриваются математические модели оптимизации маршрутов, составления расписаний, поиска кратчайшего пути на графе, статистический анализ, математические методы планирования и т.п. Некоторые из таких публикаций, наиболее близких к данному исследованию, приведены в главе 1 диссертации.

Подчеркнем, что отличительная особенность данного исследования в том, что оно ориентировано на задачи WFM в высокотехнологичных инфокоммуникационных компаниях эпохи 5G/6G. Очевидно, что производственные процессы, выполняемые почтальонами, доставщиками пиццы, операторами Колл-центров, проще формализуются и, следовательно, иначе управляются, чем производственные процессы, выполняемые, например, инженерами Ростелекома или Мегафона, которые на своих объектах в разных случаях выполняет разные задачи по подключению Интернет, телевидения, строительству и настройке сети WiFi в частном доме или офисе, установке базовых станций Private LTE и пр.

В этих условиях теоретической основы предлагаемой модели базируются на следующих допущениях.

Производственный цикл состоит из трех фаз, представленных на рис. 2.3.

Фазу 1 составляет планирование и подготовка в WFM-системе [141]  $i$ -го варианта выполнения инженерным персоналом компании  $j$ -й задачи с математическим ожиданием времени выполнения  $M[t_{ij}]$  и среднеквадратическим отклонением этого времени  $\sigma_{ij}$ . Подчеркнем, что в отличие от простых WFM-систем (почта, доставка товаров, розничная торговля и т.п.) формирования варианта выполнения в нашем случае сложных высокотехнологических сервисов это время может быть весьма значительным и превышать время непосредственно самой работы на объекте заказчика

(например, проектирование локальной офисной сети, расчет и закупка оборудования на объекте и пр.).



**Рис. 2.3. Трехфазная модель WFM**

Работы на объекте заказчика, включающие монтаж и настройку оборудования и/или эксплуатационно-техническое обслуживание, ремонт и т.п., выполняются на фазе 2 с вероятностно-временными характеристиками  $M[t_{2ij}]$  и  $\sigma_{2ij}$ , соответственно.

Фаза 3 представляет собой формирование и анализ отчета о выполненных работах, внесение соответствующих в систему Inventory (Технического учета), оценку работы инженерного персонала, перевод оборудования объекта на гарантийное/постгарантийное обслуживание и т.п. Вероятностно-временные характеристики этой фазы обозначим через  $M[t_{3ij}]$  и  $\sigma_{3ij}$ , соответственно.

Математическое ожидание времени, затрачиваемого на этот вариант  $i$  определяется по формуле

$$M[T_{ij}] = \sum_{n=1}^3 M[tn_{ij}] \quad (2.1)$$

Разумеется, более значимой характеристикой в данном случае является не среднее время выполнения варианта  $i$ , а функция распределения случайной величины (плотность вероятностей), которую не очень сложно получить при предположении, что времена выполнения фаз 1 - 3 представляют собой независимые случайные величины,

подчиняющиеся нормальному закону распределения с параметрами  $t$  и  $\sigma$ .

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^3 \sigma_{n_{ij}}^2} \quad (2.2)$$

В зависимости от характера совокупности задач  $j = 1, 2, \dots, K$ , выполняемых инженерным персоналом на объектах заказчиков в  $i$ -м варианте WFM, случайная величина времени цикла  $T_{ji}$  может подчиняться нормальному закону распределения, показательному распределению, равномерному распределению или распределению Релея.

Для нормального распределения вероятность того, что длительность цикла не превышает заданной величины  $\tau$  выражается известным соотношением

$$P\{T_{ij} \leq \tau\} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{\tau - M[T_{ij}]}{\sigma_{ij}\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.3)$$

где  $\Phi(x)$  – функция Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (2.4)$$

Из формулы (3) получаем, что при  $M[T_{ji}] = \tau$  вероятность

$$P\{T_{ij} \leq \tau\} = \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

что не может считаться разумным ограничением времени производственного цикла WFM, которое соблюдается лишь в 50% случаев.

Отсюда очевидно, что для расчета эффективности WFM-сценария  $i$  выполнения  $j=1, 2, \dots, K$  заданий проверка ограничения только математического ожидания времени цикла на превышение граничного времени цикла  $\tau$  явно недостаточна. Необходимо также учитывать функцию распределения или хотя бы второй момент распределения - среднеквадратичное отклонение.

Но такой расчет для каждого варианта  $i$  весьма трудоемкий и исключает его выполнение в реальном масштабе времени, когда, например, задачами WFM

занимается Искусственный Интеллект [135].

Поэтому предлагается сохранить анализ  $i$ -вариантов опираясь на математическое ожидание  $M[T_{ji}]$ , но вместо граничного времени его выполнения  $\tau$  выбрать другую, меньшую величину, которую обозначим  $\tau_g$ -гарантированного времени рабочего цикла.

Значение  $\tau_g$  рассчитывается таким образом, чтобы оно соответствовало практически приемлемой величине вероятности  $P$ . Точное значение зависит от конкретного применения таким образом, чтобы вероятность  $P_g$ , например, была бы не ниже 0.9.

Формула для  $\tau_g$  находится из следующих соображений. Решая уравнение

$$P_g = P\{T_{ij} \leq \tau\} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{\tau - M[T_{ij}]}{\sigma_{ij}\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.6)$$

относительно  $\tau_g$  получаем

$$\tau_g = M[T_{ji}] + \alpha\sigma_{ij} \quad (2.7)$$

где  $\alpha$ - коэффициент гарантии - вычисляется по формуле (2.8)

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{\Phi(2P_g - 1)} \quad (2.8)$$

С помощью такого приема удастся относительно просто рассчитать оптимальную  $i$ -ю стратегию WFM из набора возможных стратегий для каждого интервала работы  $[t_n, t_{n+1}]$ . Такая инженерная методика реализована и успешно функционирует в системе WFM платформы Аргус, например, о чем подробнее в главе 4.

### 2.3. Сравнение вероятностно-временных характеристик WFM

В представленной в предыдущем параграфе математической модели полагается, что случайная величина времени выполнения работ на тех или иных сегментах телекоммуникационной сети (фаза 2) имеет нормальный закон распределения с

математическим ожиданием  $M[t_{2ij}]$ . Однако, как отмечалось выше в данной диссертационной работе, разнообразные высокотехнологичные задачи персонала современной телекоммуникационной компании (апгрейд версий, ремонт и профилактика, равномерность частотного распределения, контроль параметров качества обслуживания, ввод новых сервисов и т.п.) [124] могут иметь различные распределения времен исполнения даже с одним тем же математическим ожиданием  $M[t_{2ij}]$ .

Вычисляется  $\tau_g$  через коэффициент гарантии  $\alpha$ , который для нормального распределения вычисляется по формуле (8).

В случае показательного распределения коэффициент гарантии  $\alpha_n$ , определяется следующим выражением:

$$\alpha_n = \ln(1-P_g) - 1 \quad (2.9)$$

Отметим, что для нормального распределения вероятность  $P\{T_{ji} \leq \tau\} = 0,5$  (как это упоминалось в предыдущем параграфе), где  $\tau = M[T_{ji}]$ .

Соответственно, для показательного распределения вероятность  $P_n\{T_{ji} \leq \tau\} = 0,63$  при том же  $\tau = M[T_{ji}]$ , что позволяет в нашей задаче получать меньше значение  $\tau_g$  при одних и тех же исходных данных.

Поэтому в нашей задаче предпочтительнее предположение о нормальном распределении, т.к. оно дает больший запас прочности. Хотя в первую очередь все зависит от характера выполняемой работы. Длительность работ некоторых видов лучше аппроксимируется равномерным распределением. Тогда  $\alpha_p$  определяется выражением (2.10)

$$\alpha_p = 2\sqrt{3(P_g - 0,5)} \quad (2.10)$$

Для равномерного распределения вероятность  $P_p\{T_{ji} \leq \tau\} = 0,5$  при том же  $\tau =$

$M[T_{ji}]$ , что делает его в этом смысле аналогичным нормальному распределению.

И, разумеется, во всех трех случаях  $\tau_g > \tau$ .

В заключение двух этих параграфов еще раз подчеркнем, очевидное преимущество использования гарантированных оценок  $\tau_g$  по сравнению с математическими ожиданиями  $\tau = M[T_{ji}]$ , хотя их вычисление представляет собой несколько более сложную процедуру по сравнению с определением среднего значения по формуле 2.1. Каждый, кто хоть раз из-за необходимости ремонта или установки телекоммуникационного оборудования ждал в назначенное время в квартире или в офисе инженера операторской компании, сможет подтвердить это.

## 2.4. Оптимизация WFM

Перейдем к решению оптимизационной задачи [58, 67]. Как и в разделах 2.2 и 2.3 процесс прибытия заявок на выполнение работ персоналом оператора связи подчиняется распределению Пуассона. Пусть процесс обслуживания этих заявок, согласно предыдущему разделу, также подчиняется экспоненциальному распределению. По-прежнему наша задача – поиск оптимального распределения часов работы персонала и минимизация затрат на поддержку заданного SLA уровня обслуживания и развития сети связи. Для нахождения минимальных затрат здесь используем метод множителей Лагранжа.

Сохраним обозначения:

$N$  - количество заявок, обслуживаемых персоналом за исследуемый период;

$\lambda$  - средняя скорость поступления заявок на выполнение работ в единицу времени;

$\mu_i$  - средняя скорость выполнения работ  $i$ -м сотрудником ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) в единицу времени.

Добавим новые обозначения:

$P_i$  - вероятность того, что  $i$ -й сотрудник выполняет заявку;

$s_i$  - рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (или в часах, или в рабочих днях);

$H_i(s_i)$  - среднее время, затраченное  $i$ -м сотрудником на обслуживание заявок за рабочее время  $s_i$

$$H_i(s_i) = \frac{1}{\mu_i - \frac{\lambda P_i}{s_i}} \quad (2.11)$$

откуда

$$H_i(s_i) = \frac{s_i}{s_i \mu_i - \lambda P_i} \quad (2.12)$$

$W$  - ожидаемое число рабочих смен (часов, дней)  $s_i$  для обслуживания заявки

$$W = \sum_{l=1}^K P_l H_l(s_l) \quad (2.13)$$

$V$  - среднее время обслуживания заявки Оператором связи

$$V = \sum_{l=1}^K \frac{P_l}{\mu_l} \quad (2.14)$$

Тогда относительную загрузку персонала Оператора связи (определяющую в значительной мере эффективность системы WFM) можно оценить с помощью коэффициента загрузки  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^K \frac{P_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^K \frac{P_i s_i}{s_i \mu_i - \lambda P_i}} \quad (2.15)$$

Очевидно, что

$$0 < \rho < 1. \quad (2.16)$$

Если бы поток заявок на выполнение работ был бы более упорядоченным, и если бы все сотрудники оператора связи имели бы одинаковые квалификацию и получали бы равную зарплату, то оптимизационная задача сводилась бы к нахождению

максимально приближенного к 1 значения  $\rho$ .

Но, во-первых, при самом тщательном планировании работ по развитию сети, профилактическим и ремонтным работам, апгрейдам оборудования, заменам версии программного обеспечения и пр. поток заявок все же носит случайный характер и полагается в настоящей работе соответствующим распределению Пуассона. Последнее делает невозможным близкое к 1 значение  $\rho$ , поэтому целесообразно иметь целевую величину  $\rho_0$  в диапазоне 0,65 – 0,95.

И во-вторых, в реальной жизни равенства в квалификации, производительности и оплате труда не бывает [93], и каждый сотрудник имеет свое значение стоимости единицы рабочего времени  $\Psi_i$ . Поэтому далее будем оперировать не с часами, а с суммарными расходами на персонал  $\Psi$  ( $\min(\Psi)$  по всем  $S$ )

$$\min(S)\Psi = \sum_{i=1}^K \Psi_i s_i \quad (2.17)$$

В этой задаче линейного программирования  $\lambda$ ,  $\rho_0$ ,  $\Psi_i$ ,  $\mu_i$ ,  $P_i$  являются исходными параметрами, а  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_K\}$  – переменные решения функции стоимости.

Задача решается методом множителей Лагранжа. Введем целевую функцию

$$L = \sum_{i=1}^K \Psi_i s_i - \Lambda \left( \rho - \frac{w}{v} \right) \quad (2.18)$$

где  $\Lambda$  - множитель Лагранжа (вопреки традиции обозначим его большой буквой  $\Lambda$ , так как  $\lambda$  у нас занята, - она обозначает интенсивность поступления заявок).

Пусть  $S^* = (s_1^*, s_2^* \dots s_K^*)$  и  $\Lambda^*$  оптимальное решение модели.

Тогда частная производная функции  $L$  по  $s_i$  имеет вид:

$$\frac{\partial L}{\partial s_i} = \Psi_i - \frac{v P_i^2 \lambda \Lambda}{w^2 (s_i \mu_i - \lambda P_i)^2} = 0 \quad (2.19)$$

откуда

$$\frac{VP_i^2\lambda\Lambda}{W^2(s_i\mu_i - \lambda P_i)^2} = \Psi_i \quad (2.20)$$

и

$$(s_i\mu_i - \lambda P_i)^2 = \frac{VP_i^2\lambda\Lambda}{W^2\Psi_i} \quad (2.21)$$

или

$$(s_i\mu_i - \lambda P_i) = \frac{\sqrt{V\lambda\Lambda}\cdot P_i}{W\sqrt{\Psi_i}} \quad (2.22)$$

Отсюда находим величины  $s_i$

$$s_i = \frac{\lambda P_i}{\mu_i} + \frac{\sqrt{V\lambda\Lambda}\cdot P_i}{\mu_i W\sqrt{\Psi_i}} \quad (2.23)$$

Вторая частная поизводная по  $\Lambda$  также приравнивается 0.

$$\frac{\partial L}{\partial \Lambda} = 0 \quad (2.24)$$

и после некоторых преобразований получается следующее выражение для оптимальных величин  $s_i^*$ :

$$s_i^* = \frac{P_i}{\mu_i} \left( \lambda + \frac{\sqrt{V\lambda\Lambda}\cdot\rho_o}{V\sqrt{\Psi_i}} \right) = \frac{P_i}{\mu_i} \left( \lambda + \rho_o \sqrt{\frac{\lambda\Lambda^*}{V\Psi_i}} \right) \quad (2.25)$$

Так как  $s^*$  зависит от множителя Лагранжа  $\Lambda^*$ , то найдем значение  $\Lambda^*$  по следующей формуле (2.26):

$$\Lambda^* = \lambda \left( \sum_{i=1}^K \frac{P_i\sqrt{\Psi_i}}{\mu_i\sqrt{V}(1-\rho)} \right)^2 \quad (2.26)$$

Таким образом, множитель Лангранжа  $\Lambda$  фактически определяет прирост относительной эффективности  $\rho$  обслуживания заявок системой WFM [112]. Поэтому можно рассмотреть эту функцию Лагранжа  $L$  и как функцию от  $\rho$ .

Тогда частная производная по  $\rho$  функции Лагранжа из (2.18) приобретает следующий вид

$$\frac{\partial L(\rho)}{\partial \lambda(\rho)} = \sum_{i=1}^K \Psi_i s_i^*(\rho) - \Lambda^*(\rho) \frac{V}{W^*(\rho)} + \Lambda^*(\rho) \quad (2.27)$$

С учетом этого можно рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) при условии, что  $S_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, \dots, K$

$$W^* = \sum_{i=1}^K \frac{P_i s_i}{s_i \mu_i - \lambda P_i} \quad (2.28)$$

В заключение этого параграфа подчеркнем, что эффективность управления персоналом определяется не только длительностью пребывания заявок на обслуживание в системе, поступающих в нее с интенсивностью  $\lambda$ , но и обратно пропорционально совокупной стоимости персонала с учетом разных квалификации и производительности сотрудников  $\mathbf{S}^* = (s_1^*, s_2^* \dots s_K^*)$ .

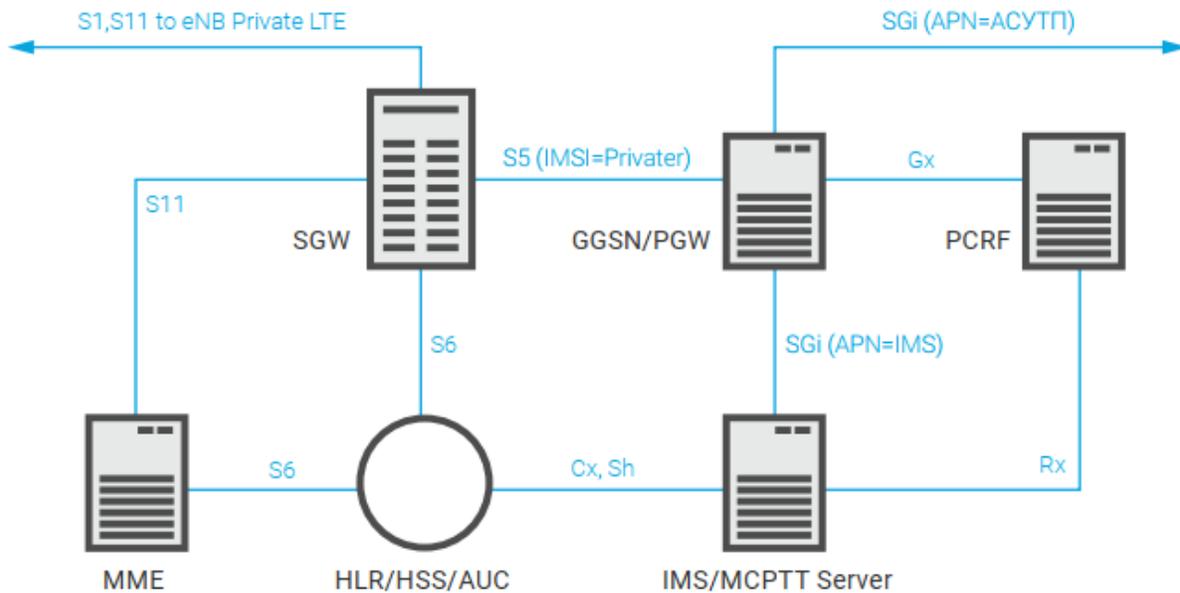
Представленные в этих первых трех параграфах данной главы аналитические выражения подтвердим и проиллюстрируем численными вариантами расчета.

## 2.5. Расчет математической модели WFM

Инженерные расчеты разработанной в диссертации модели WFM производились для некоторых IT-компаний, обладающих достаточно большой численностью персонала и разнообразием квалификаций. Некоторые результаты этих расчетов отражены в актах о внедрении в Приложении 1 к диссертации. Но эти расчеты несколько громоздки и не совсем подходят для иллюстрации и апробации разработанной модели.

Поэтому в данном параграфе мы разберем совсем малоразмерную (но абсолютно реальную) инженерную задачу. Речь идет о проекте ядра небольшой корпоративной сети Private LTE (рис. 2.4), включающим некоторые подготовительные инженерно-

строительные работы, развертывание оборудования, пуско-наладочные работы, тренировку и передачу в опытную эксплуатацию.



**Рис. 2.4. Ядро сети Private LTE разработки НТЦ Протей**

Работы выполнял небольшой коллектив всего из 4 опытных специалистов (с соответствующей высокой зарплатой), имеющих тем не менее различную квалификацию (и различную зарплату) и задействовавшихся и в некоторых других работах в организации [103]. Исходя из параметров проекта и требований заказчика были рассчитаны его вероятностно-временные характеристики и, в частности, желаемый срок выполнения составил 1,2 квартала или 2240 часов. Соответственно рассчитанная величина  $\tau_g$  гарантированного с заданной вероятностью времени работ является 0,95 квартала. Заметим, что в данном примере расчета за единицу времени принят квартал.

Приведем численные исходные данные данного проекта с учетом принятых в этой главе обозначений.

Интенсивность поступления заявок на выполнение работ в единицу времени;  $\lambda$

= 5.

Средняя скорость выполнения работ  $i$ -м сотрудником ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) в единицу времени (квартал):

$$\mu_1 = 1,4$$

$$\mu_2 = 1,1$$

$$\mu_3 = 1,6$$

$$\mu_4 = 0,9$$

Вероятность того, что  $i$ -й сотрудник выполняет заявку:

$$P_1 = 0,2$$

$$P_2 = 0,1$$

$$P_3 = 0,4$$

$$P_4 = 0,3$$

Напомним, что каждый сотрудник имеет свое значение стоимости единицы рабочего времени за квартал (в данном случае – квартала, в тысячах рублей)

$$\Psi_1 = 800$$

$$\Psi_2 = 600$$

$$\Psi_3 = 1200$$

$$\Psi_4 = 500$$

Таким образом заданы исходные параметры для данной оптимизационной задачи линейного программирования  $\lambda, \Psi_i, \mu_i, P_i$ . Варьируется оставшийся исходный параметр  $\rho_0$ .

Прежде всего находим независящее от  $\rho_0$  среднее чистое время обслуживания заявки Оператором связи  $V$  как сумму четырех величин  $P_i/\mu_i$ :

$$V = 1/7 + 1/11 + 1/4 + 1/3 = 0,817$$

Заметим, что  $0,817 < \tau_g = 1,2$ , так что есть возможность оптимизировать стоимость работ без превышения  $\tau_g$ .

Примем  $\rho_0 = 0,6$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 23650.$$

Оптимальное рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 1,87$$

$$s_2^* = 1,30$$

$$s_3^* = 2,90$$

$$s_4^* = 5,06$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3, 4$ .

$$W^* = 1,307$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Остается найти суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму

$$\sum \Psi_i^* s_i^* = 8286 \text{ тысяч руб.}$$

Примем  $\rho_0 = 0,7$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 42044.$$

Оптимальное рабочее время [71] в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 2,51$$

$$s_2^* = 1,77$$

$$s_3^* = 3,81$$

$$s_4^* = 6,96$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3, 4$ .

$$W^* = 1,138$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Определим суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму  $\sum \Psi_i^* s_i^*$   
 $= 11122$  тысяч руб.

Примем  $\rho_0 = 0,75$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 60544.$$

Оптимальное рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 3,02$$

$$s_2^* = 2,15$$

$$s_3^* = 4,54$$

$$s_4^* = 8,47$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3, 4$ .

$$W^* = 1,062$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Определим суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму  $\sum \Psi_i^* s_i^*$   
 $= 13389$  тысяч руб.

Примем  $\rho_0 = 0,8$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 76632.$$

Оптимальное рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 4,17$$

$$s_2^* = 2,49$$

$$s_3^* = 5,20$$

$$s_4^* = 9,83$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3, 4$ .

4.

$$W^* = 1,014$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Остается найти суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму

$$\sum \Psi_i^* s_i^* = 15935 \text{ тысяч руб.}$$

Повторим эти расчеты для значений  $\rho_0 = 0,6, 0,7, 0,9$  и сведем результаты в следующую таблицу.

Примем  $\rho_0 = 0,85$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 168177.$$

Оптимальное рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 5,07$$

$$s_2^* = 3,65$$

$$s_3^* = 7,47$$

$$s_4^* = 14,52$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3,$

4.

$$W^* = 0,947$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Определим суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму  $\sum \Psi_i^* s_i^*$   
= 22470 тысяч руб.

Примем  $\rho_0 = 0,9$ .

Вычисляем  $\Lambda^*$  по формуле (2.26) и получаем величину

$$\Lambda^* = 378400.$$

Оптимальное рабочее время в сменах  $i$ -го сотрудника (в кварталах)  $s_i^*$  вычисляется по формуле (2.25):

$$s_1^* = 7,63$$

$$s_2^* = 5,54$$

$$s_3^* = 11,15$$

$$s_4^* = 22,08$$

Теперь мы можем рассчитать  $W^*$  по формуле (2.28) для  $s_i = s_i^*$  для  $\forall i = 1, 2, 3,$   
4.

$$W^* = 0,899$$

и проверить, что  $W^* \leq \tau_g$ .

Определим суммарные затраты  $\Psi$  на данный вариант WFM как сумму  $\sum \Psi_i^* s_i^*$   
= 33824 тысяч руб.

Сведем результаты расчетов в таблицу 2.1.

$\lambda, з\backslashкв$	5					
$\Lambda^*$	23650	42044	60544	76632	168177	378400
$\mu_1, з\backslashкв$	1,4					
$\mu_2, з\backslashкв$	1,1					
$\mu_3, з\backslashкв$	1,6					
$\mu_4, з\backslashкв$	0,9					
$\rho_0$	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
$V, кв$	0.817					
$s_1^*$ тыс.руб\кв	1,87	2,51	3,02	4,17	5,07	7,63
$s_2^*$ тыс.руб\кв	1,30	1,77	2,15	2,49	3,65	5,54
$s_3^*$ тыс.руб\кв	2,90	3,81	4,54	5,20	7,47	11,15
$s_4^*$ тыс.руб\кв	5,06	6,96	8,47	9,83	14,54	22,08
$W^*, кв$	1,307	1,138	1,062	1,014	0,947	0,899
$\Psi_1,$ тыс.руб\кв	800					
$\Psi_2,$ тыс.руб\кв	600					
$\Psi_3,$ тыс.руб\кв	1200					
$\Psi_4,$ тыс.руб.\кв	500					
$\Psi,$ тыс.руб.\кв	8266	11122	13389	15935	22470	33824

Таблица 2.1. Сводные результаты расчетов

Данный расчет специально приведен столь подробно, чтобы показать разные возможные подходы к оптимальному проектированию WFM оператора связи в том или ином проекте. В частности, показано, что при величина гарантированного с заданной вероятностью времени работ  $\tau_g = 0,95$  квартала оптимальная стоимость работ бригады

из 4 инженеров с соответствующими квалификациями и окладами составляет 22 470 000 рублей. Напомним, что в течение данного квартала эти инженеры могут также участвовать и в других проектах, а их вовлеченность в рассчитанный проект определяется величинами  $S_i^*$ .

Отметим также, что в случае некоторого небольшого увеличения гарантированного времени до  $\tau_g = 1,14$  квартала стоимость работ можно сократить вдвое. Из таблицы 2.1 могут быть получены и другие варианты минимизации стоимости или минимизации времени выполнения работ.

И последнее замечание. Приведенная математическая модель имеет очевидную инженерную направленность, но в определённом смысле сохраняет относительную абстрактность. Дело в том, что в ней не учитываются требования КЗоТ, наличие выходных дней и пр. Для приведенного в качестве примера конкретного кратковременного проекта эти факторы не оказывают влияния. Тем не менее для множества других случаев (например, работа операторов Call-центра) они приобретают существенное значение. Эти ситуации и соответствующие математические модели рассматриваются в главе 3 настоящей диссертации.

## **2.6. Модель нейронной сети WFM**

Вернемся к рис.2.1. Ясно, что эффективность предложенной математической модели существенным образом зависит от характера кривой  $\lambda(t)$  и длительности интервала  $[t_n, t_{n+1}]$ . Длительность этого «периода стабильности» на рис. 2.1 определяет «срок жизни» вероятностно-временных характеристик, рассчитанной по формулам разделов 2.2 - 2.3 этой главы, и оптимальной стратегии WFM, рассчитанной по формулам раздела 2.4.

По мере роста параметра  $x=1/(t_{n+1} - t_n)$ , как это показано на рис. 2.2, становится все более эффективным управление средствами нейронных сетей [34]. Интерес к

нейронным сетям в управлении WFM возрос в самые последние годы, что во многом это связано с возможностями, которые возникли с широким распространением высокопроизводительных и относительно дешевых компьютеров. Рост вычислительной мощности позволил на практике осуществить идеи, высказанные идеологами изучения искусственного интеллекта еще в 90-е годы XX века. Одной из таких идей является нейронная сеть Хопфилда — полносвязная нейронная сеть с симметричной матрицей связей, структурная схема которой приведена на рис.2.5.

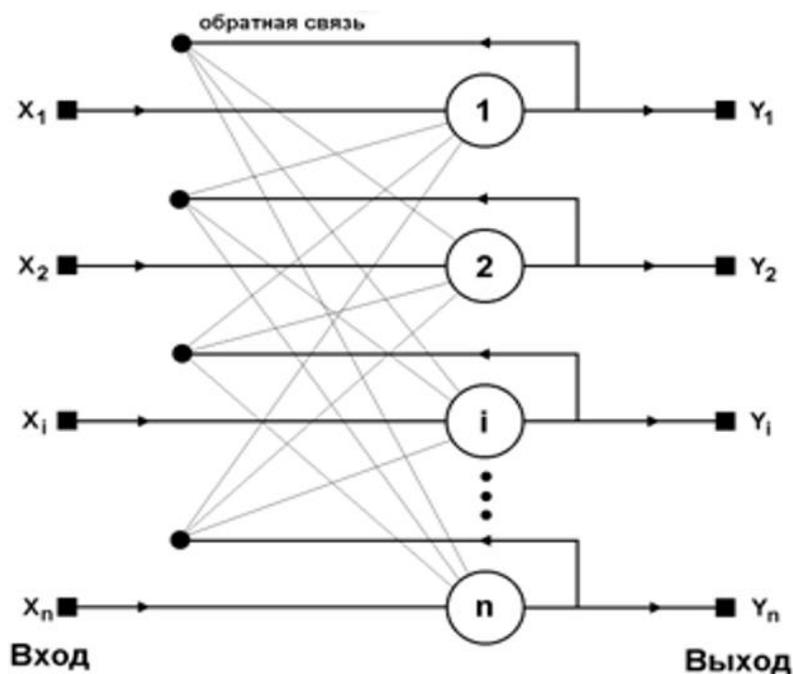


Рис. 2.5. Структурная схема сети Хопфилда

В процессе работы динамика таких сетей сходится к одному из положений равновесия [42]. Эти положения равновесия являются локальными минимумами функционала, называемого энергией сети (в простейшем случае — локальными минимумами отрицательно определённой квадратичной формы на  $n$ -мерном кубе). Сеть может быть использована для решения некоторых задач оптимизации работы WFM благодаря своей ассоциативности, а также уменьшения функции Ляпунова в процессе работы сети. Это позволяет увеличить качество работы инженеров компании, обеспечить автоматическую подстройку оптимальных маршрутов обслуживания объектов,

осуществлять контроль за перемещениями инженерно-технических исполнителей в реальном времени или с использованием записи GPS-трека.

Тем не менее, убедительных результатов оптимизации фазы 2 процессов WFM средствами нейросети Хопфилда автору получить не удалось. Впрочем, строго говоря, такой цели и не ставилось, т.к. математические модели этой главы позволяют рассчитать оптимальную стратегию WFM на год, на квартал, на месяц, наконец, на неделю, а пересчитывать и менять эту стратегию в середине рабочей недели или, того хуже, в течение рабочего дня вряд ли можно считать целесообразным. Но применение аппарата нейронных сетей для фазы 3 процесса WFM оказалось весьма эффективным.

Напомним, что фаза 3 процесса WFM - анализ отчетов о выполненных работах, внесение соответствующих в систему технического учета, оценка работы инженерного персонала, расчет KPI, проверка и сохранение фотоотчета с объекта, перевод оборудования объекта на гарантийное/постгарантийное обслуживание, соответствующее документирование отремонтированного и/или вновь установленного телекоммуникационного оборудования.

Все эти функциональные возможности системы помогают уменьшить время обслуживания клиентов, т.е. сократить времена на подбор исполнителей и времени визита, при звонке диспетчеру технической поддержки.

Эффективным автоматизированным средством обработки отчетов инженерного персонала телекоммуникационного оператора с объектов заказчиков представляется программная подсистема, входящая в состав WFM и базирующаяся на искусственной нейронной сети анализа отчетов  $S_{ao}$ .

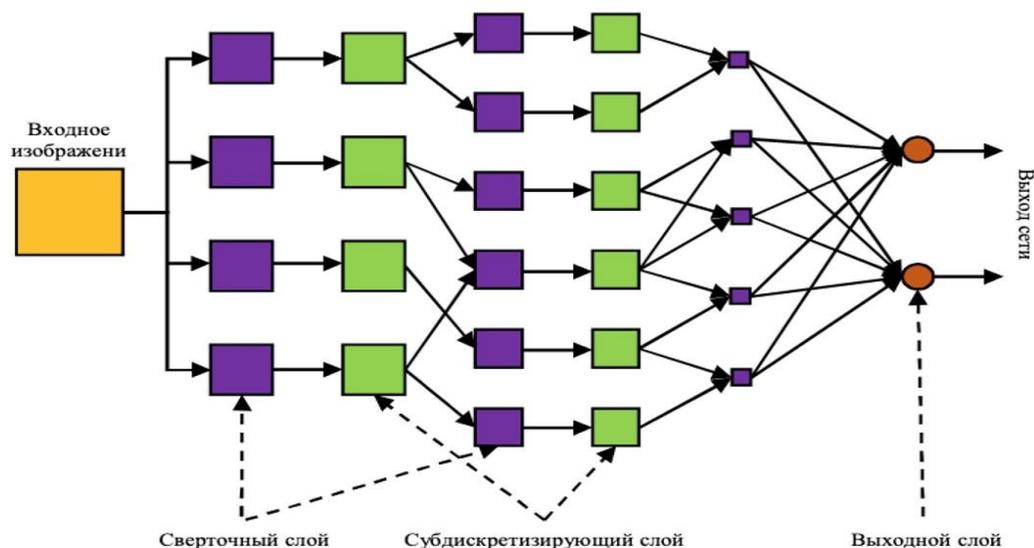


Рис.2.6. Фрагмент сверточной нейронной сети анализа отчетов  $S_{ao}$

В процессе работы сети анализа отчетов  $S_{ao}$  производится целенаправленное изменение параметров нейронов (весов входов  $w_i$  и порогов  $T_j$ ), преследующее цель реализовать в процессе обучения выходную функцию интегральной оценки отчета о выполнении работы на объекте заказчика – функции  $F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . Здесь  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) представляют собой набор оценок выполнения того или иного КРІ на основе представленного отчета.

Для управления и контроля работы инженерного персонала на выезде используется прикладываемые к каждому отчету о выполненной работе подписанный клиентом акт, наряд-заказ, паспортные данные установленного у абонента оборудования и еще 'селфи' с объекта, т.е. фото сотрудника у клиента или на ином месте работы, которое также должно быть приложено к отчету о проделанной работ (рис.2.7).



Рис.2.7. Фотоотчеты с объектов

Дело в том, что сотрудникам телекоммуникационной компании необходимо надевать униформу. Она помогает определить их принадлежность, что важно не только с маркетинговой точки зрения, но и с точки зрения безопасности клиентов. В том числе и поэтому выполнив работу, инженер отправляет в офис отчет по WhatsApp, в котором помимо указания сделанных работ, установленного оборудования, времени прихода и ухода прикладывается фотографии с места работы, примеры которых приведены здесь.

В 2020 году в связи с пандемией COVID-19 в регламенты проведения работ инженерами телекоммуникационной компании на объектах заказчика добавлено обязательное ношение маски. Выполнение этого нового требования путем анализа фотографий из электронных отчетов о выполнении заказов и проверяет нейронная сеть  $S_{ao}$ .

Таким образом, представленные в этой главе модели и подходы позволяют средствам WFM телекоммуникационного оператора эффективно выполнять свои функции, разрабатывать и управлять рабочими графиками инженерных сотрудников компании, выездами на объекты заказчиков, распределением нагрузки на работников с заданной производительностью, вносить в модель любые сопутствующие события

(отпуска, отгулы, больничные), планировать и контролировать загруженность инженеров в режиме реального времени, формировать и хранить отчёты по различным показателям с возможностью начисления премий по результатам выполненных работ.

Со стратегической точки зрения ценность предложенного подхода заключается в заложенном в нем междисциплинарном мышлении, базирующемся как на традиционных методах расчета вероятностно-временных характеристик, так и на моделях бизнес-аналитики BI, искусственного интеллекта AI, машинного обучения ML [48]. В результате этого и в отличие от систем управления человеческими ресурсами (HR), финансовых и маркетинговых систем, другими информационных систем ИТ-ландшафта Оператора связи предлагаемая в статье подход к WFM рассматривает инженерно-технический состав как основные интегрированные инвестиции Оператора, которыми необходимо эффективно управлять в масштабах всей сети, чтобы обеспечить максимальная производительность, максимальную отдачу от этих инвестиций.

Это позволяет Оператору более эффективно и действенно вводить новые сетевые технологии и услуги, осуществлять стратегическое развитие своих NGN и пост-NGN сетей силами имеющегося в распоряжении Оператора инженерно-технического персонала, повышая ключевые показатели эффективности (KPI) средствами перспективной системы WFM.

## **Выводы главы 2**

1. Сформулированы принципы функциональной модели WFM, представлены формализованные описания основных этапов управления.
2. Разработана трехфазная математическая модель WFM, определены ключевые вероятностно-временные характеристики.
3. Получены аналитические выражения для расчета BBX при нормальном, равномерном и экспоненциальном распределениях времени выполнения работ.
4. Решена оптимизационная задача, позволяющая рассчитать максимально

эффективную по заданным критериям стратегию WFM при существующих ограничениях.

5. Разработана модель нейронной сети для эффективной организации WFM на фазе 3 и проведено ее обучение. Модель реализована на языке Python и приведена в Приложении 2 диссертации.

## ГЛАВА 3. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗИЯ WFM

### 3.1. Планирование смен эксплуатационного персонала Оператора связи

В данной главе сосредоточимся на моделях планирования и составления расписания [91] эксплуатационного персонала Оператора связи. В терминах трехфазной модели, представленной на рис. 2.3, основные исследования предыдущей главы сосредоточены на фазах 2 и 3. Именно для них в первую очередь ориентированы разработанные в главе 2 математические модели. Здесь же в большей степени сосредоточимся на фазе 1, где вероятностно-временные характеристики оказывают меньшее влияние, что упрощает математическую модель и делает ее более прагматичной и наглядной. С другой стороны, появляется возможность применения математических моделей линейного программирования для оптимизации WFM в фазе 1.

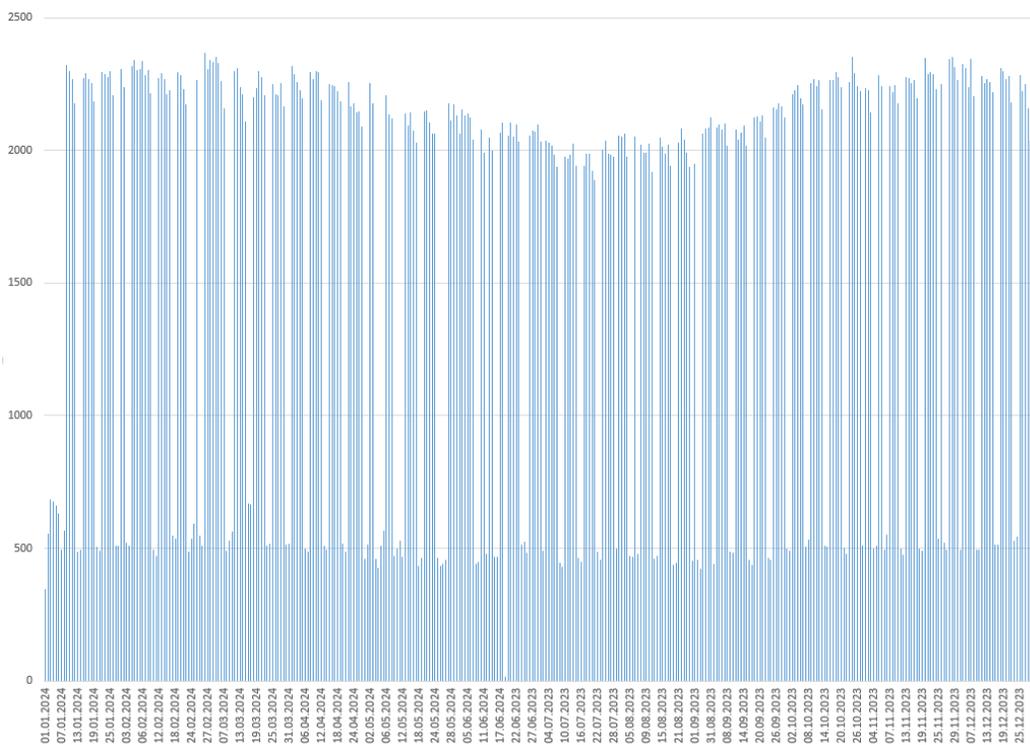
Итак, распределение и планирование эксплуатационного персонала телекоммуникационного Оператора связано с составлением графиков работы и распределением персонала по сменам, чтобы обслуживать поток запросов с интенсивностью  $\lambda$  согласно описанию главы 2, который поступает прежде всего к сотрудникам первой линии технической поддержки. Как было показано на рис. 2.1, поток поступающих запросов весьма нерегулярный, следовательно, потребности в сотрудниках меняются с течением времени. А также зависит от сезона и различных событий, происходящих как внутри сети, так и во вне. Кроме уже проанализированного соотношения  $\lambda$  и интенсивности обслуживания запросов  $\mu$ , планирование WFM, как правило, подчиняются различным другим ограничениям, продиктованным требованиями к навыкам сотрудников, опыту, распределением зон ответственности, графика работ и так далее. В результате этого возникающая задачи планирования расписания выполнения работ, как правило, являются комбинаторно

сложными.

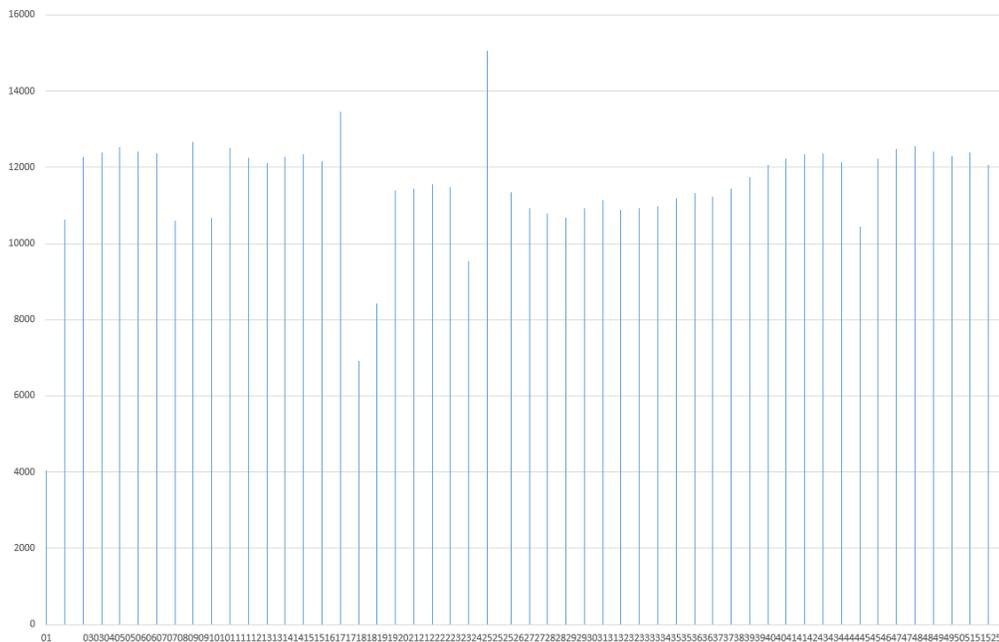
Сначала рассмотрим традиционную задачу планирования персонала, для которой существует относительно простое решение. Затем опишем более общую задачу целочисленного программирования, которая охватывает широкий класс задач планирования персонала. Впоследствии мы рассмотрим особый класс этих задач целочисленного программирования, а именно циклические кадровые задачи. Этот класс задач имеет много применений на практике и прост с комбинаторной точки зрения. Затем мы рассмотрим несколько частных случаев и расширений циклического планирования персонала.

На рис. 3.1 – 3.3 представлена статистика по одному (самому крупному) оператору страны. Эти данные положены в основу расчётов данной главы.

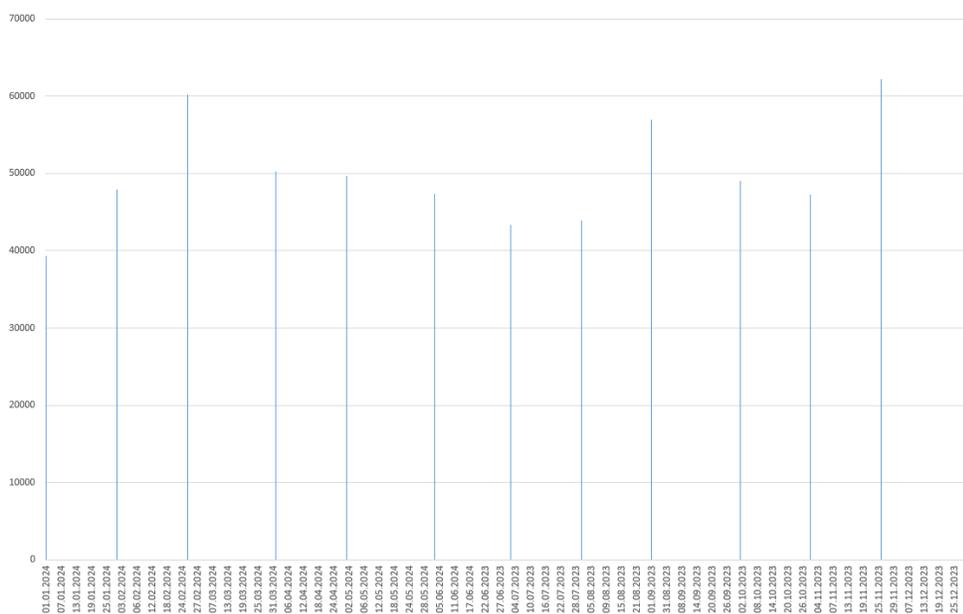
Рис. 3.1 отображает эту статистику в течение года с точками, соответствующими каждому дню. Рис. 3.2 показывает еженедельную статистику в течении года, а рис. 3.3 иллюстрирует исторические данные по месяцам за последние 5 лет.



**Рис. 3.1. Количество сотрудников по дням**



**Рис. 3.2 Количество сотрудников по неделям**



**Рис. 3.3 Количество сотрудников по месяцам**

Каждый день недели у Оператора должно присутствовать определенное [72] (но не обязательно одинаковое) число сотрудников. Потребности в их составе и количестве могут меняться изо дня в день, что подробно обсуждалось в главе 2 в связи с рис.2.1. Здесь для анализа введем допущение, что набор запросов остается

неизменным из недели в неделю в течение одного года. Существует общее количество доступных сотрудников, и каждому должна быть назначена определенная последовательность дней (рабочее расписание). Однако распределение дней для любого конкретного сотрудника может отличаться от недели к неделе, зависеть от планируемой нагрузки, а также соответствовать положениям КЗоТ. Под неделей мы подразумеваем семь дней, которые начинаются с понедельника и заканчиваются воскресеньем. В данном случае задача заключается в том, чтобы рассчитать минимальное количество сотрудников для выполнения работы семь дней в неделю таким образом, чтобы выполнялись заданные условия.

Для этого разделим задачу на несколько составляющих. Вначале определим формулу для планирования выходных дней. Затем, с учетом требований выходных дней и количества сотрудников, составим рабочие смены. И зададим состав смен на указанный промежуток времени. Применим полученные расчёты на практической задаче по планированию сотрудников полевой эксплуатации оператора связи.

## 3.2. Планирование выходных дней

Определим, что в день операторская компания в целом должна выполнить  $n_j$  задач. Так как количество задач зависит от дня недели, то  $j=1, \dots, 7$ , ( $n_1$  это понедельник и  $n_7$  это воскресенье).

При этом для соблюдения КЗоТ и сокращения издержек по переработкам, зададим [76], что каждому сотруднику должно быть предоставлено  $k_1$  из каждого  $k_2$  выходных дня. При этом каждый сотрудник должен работать ровно 5 из 7 дней (в любой день с понедельника по воскресенье). И допускается работа сотрудника не более 6 дней подряд (если рассматривать две недели подряд).

Исходя из заданных условий получим следующие примеры влияния на рабочий график каждого сотрудника.

*Первое.* Для того, чтобы не нарушать ограничение – работать 5 из 7 дней в неделю,

у сотрудника должно быть более одного выходного в неделю, т.е. он не сможет работать шесть дней подряд в неделю.

*Второе.* С другой стороны, согласно данным ограничениям у сотрудника может быть более двух выходные подряд, например, в субботу, воскресенье одной недели и понедельник другой недели. Правда должно соблюдаться следующее условие, что после трех выходных подряд сотрудник работает не менее 5 дней в оставшиеся дни недели. При этом допускается, что сотрудник кроме выходного в понедельник может получить еще один выходной после двух или трех рабочих дней.

*Третье.* При таком распределении выходных допускается, что сотрудник будет работать пятницу, субботу, воскресенье одной недели и понедельник, вторник и среду следующей недели. А вот еще один рабочий день в четверг не допускается, так как это уже нарушит изначально заданное ограничение.

Теперь опишем метод, который позволит составить расписание на одну неделю, но с условием, что после того, как расписание для недели  $i$  подготовлено, определяется расписание для недели  $i + 1$ . Так как необходимо учитывать влияние расписания  $i$  недели на составление расписания  $i+1$  недели. И так далее, исходя из рассмотренных выше ограничений. Рассматривая несколько итераций составления расписания, получим циклический график работ, который будет повторяться каждые несколько недель.

Теперь представим задачу составления расписания в виде следующих математических уравнений, где  $R$  это минимально необходимое количество сотрудников для выполнения требуемого объема задач [78].

Первое уравнение получим исходя из ограничения на выходные дни. Среднее количество сотрудников, доступных каждые выходные, должно быть достаточным для выполнения максимального количества задач в эти дни. В  $d_2$  недель каждый сотрудник доступен для  $d_2 - d_1$  выходных. Итак, предполагая, что (как можно ближе) одинаковое

количество работников получают каждый из  $d_2$  выходных дней получаем (3.1):

$$(d_2 - d_1) \cdot R = d_2 \max(n_1, n_7) \quad (3.1)$$

что соответствует следующему неравенству (3.2)

$$R \geq \frac{d_2 \max(n_1, n_7)}{d_2 - d_1} \quad (3.2)$$

Второе уравнение определим исходя из существующего ограничения общей потребности в сотрудниках. Общее количество рабочих дней в неделю должно быть достаточным для выполнения общего количества еженедельных задач. А так как каждый сотрудник должен работать не более пяти дней в неделю, то получаем следующее неравенство (3.3):

$$R \geq \sum_{j=1}^7 n_j$$

или

$$R \geq \frac{1}{5} \sum_{j=1}^7 n_j \quad (3.3)$$

Третье же уравнение получим как ограничение на максимальную ежедневную потребность численности сотрудников (3.4)

$$R \geq \max(n_1, \dots, n_7) \quad (3.4)$$

Исходя из все трех полученных уравнения, минимальная численность сотрудников должна быть не менее наибольшей из всех трех нижних границ данных уравнений.

Разработаем алгоритм, который решает эту задачу, то есть находит расписание, удовлетворяющее всем ограничениям, с использованием минимального возможного числа сотрудников [86]. Для этого уточним ранее данное определение и пусть  $R$  будет обозначать максимум из трех нижних границ, а  $n$  – максимальное требование к численности сотрудников на выходных, т.е.,

$$n = \max(n_1, n_7)$$

Пусть

$$z_j = R - n_j, \text{ для } j = 1, \dots, 5 \text{ и}$$

$$z_j = n - n_j, \text{ для } j = 6 \text{ и } 7;$$

$z_j$  является избыточным числом сотрудников по отношению к дню  $j$ . Вторая нижняя граница получается (3.5)

$$\sum_{j=1}^7 n_j \geq 2n \quad (3.5)$$

Для того, чтобы сократить издержки, связанные с выходными днями, их будем предоставлять в те дни, когда наблюдается большой избыток сотрудников. Для составления данного расписания воспользуемся алгоритмом основанном на использовании списка так называемых пар выходного дня. Пары в этом списке пронумерованы от 1 до  $n$ , и список создается следующим образом: сначала выбираем день  $d$  таким образом, чтобы

$$\geq \max(n_1, \dots, n_7)$$

$$u_k = \max(u_1, \dots, u_7).$$

Во-вторых, выбираем день  $l$ , ( $l = d$ ), такой, чтобы  $z_l > 0$ ; если  $z_l = 0$  для всех  $l = d$ , тогда выбираем  $l = d$ . В-третьих, добавляем пару  $(d, l)$  в список и уменьшаем оба  $z_d$  и  $z_l$  к 1. Повторяем эту процедуру  $n$  раз. В конце списка могут появляться пары вида  $(d, d)$ ; эти пары называются неразличимыми парами.

Теперь пронумеруем сотрудников от 1 до  $R$ . При этом надо обратить внимание, что поскольку максимальное число сотрудников в выходные дни составляет  $n$ , остальные  $R - n$  сотрудников могут иметь в это время выходной.

Теперь рассмотрим работу получившегося алгоритма планирования выходных дней. Для этого разделим ее на составляющие. Вначале для сотрудников зададим

выходные дни; потом исходя из получившегося расписания определим типовые графики работ; назначим пары выходных сотрудникам на неделе 1; назначим пары выходных сотрудникам на неделе  $i$ . Теперь рассмотрим каждый из этих шагов детальнее.

#### Шаг 1. Запланировать выходные дни

На этом шаге составим рабочее расписание для сотрудников, где будут указаны какие дни рабочие, а какие будут являться выходными. Для чего назначим первый выходной первым  $R - n$  сотрудникам. Затем назначим второй выходной день вторым  $R - n$  сотрудникам. Таким образом все лишние сотрудники у нас будут отправлены на выходные.

Этот процесс продолжается циклически, при этом сотрудник 1 рассматривается как следующий сотрудник после сотрудника  $R$ .

#### Шаг 2. Определить тип рабочего графика для каждого сотрудника на неделе 1

На неделе 1 каждый сотрудник попадает в одну из четырех категорий.

Категория  $K_1$ : выходных 1 выключено; 0 выходных дней, необходимых в течение недели 1; выходные 2 выключено.

Категория  $K_2$ : выходные 1 выключено; 1 выходной день требуется в течение недели 1; выходные 2 включены.

Категория  $K_3$ : 1 выходной включен; 1 выходной день требуется в течение недели 1; 2 выходных выключены

Категория  $K_4$ : выходные 1 включен; 2 выходных дня, необходимых в течение недели 1; выходные 2 включены

Поскольку каждые выходные работают ровно  $n$  человек,

$$|K_3| + |K_4| = n \text{ (из-за выходных 1);}$$

$$|K_2| + |K_4| = n \text{ (из-за выходных 2).}$$

Из этого следует, что  $|K_2| = |K_3|$ .

Соединим каждого сотрудника  $K_2$  с одним сотрудником  $K_3$ .

Шаг 3. (Назначение пары выходных сотрудникам на неделе 1)

Назначим  $n$  пар из верхней части списка.

Сначала сотрудникам  $K_4$ : каждый сотрудник  $K_4$  получает оба выходных дня.

Второй для сотрудников  $K_3$ : каждый сотрудник  $K_3$  получает от своей пары более ранний выходной (субботу), а его товарищ из  $K_2$  получает от той же пары более поздний выходной (воскресенье). (Таким образом, каждый сотрудник  $K_3$  и  $K_2$  получает один выходной на неделе 1)

Шаг 4. Назначение пары выходных сотрудникам на неделе  $i$

Предположим, что расписание было создано на недели  $1, \dots, i-1$ .

Категоризацию сотрудников можно выполнить для недели  $i$  таким же образом, как и на шаге 2. Для того чтобы распределить сотрудников по парам выходного дня, необходимо рассмотреть два варианта.

Вариант 1: (Все пары выходных в списке различны)

Сотрудники  $K_4$  и  $K_3$  связаны с теми же парами, с которыми они были связаны на первой неделе  $i-1$ .

Сотрудник  $K_4$  получает от своей пары оба выходных дня.

Сотрудник  $K_3$  получает от пары, с которой он связан, более ранний выходной, а его компаньон из  $K_2$  получает от этой пары более поздний выходной.

Вариант 2: (Не все пары выходных в списке различны)

Неделя  $i$  запланирована точно так же, как и неделя 1, независимо от недели  $i-1$ .

Установим  $i = i + 1$  и вернемся к шагу 4.

Этот алгоритм нуждается в некотором приближении. Во-первых, может быть не

сразу ясно, что мы никогда не столкнемся с необходимостью назначать работнику типа К4 неразличимую пару дней. В этом случае работнику требуется два выходных дня в неделю, и мы стараемся дать ему один и тот же день дважды. Можно показать, что число сотрудников К4 всегда меньше или равно числу различных пар.

Если в списке выходных дней есть неразделимые пары, т.е. пары (d, d), то неделя  $i$  не зависит от недели  $i-1$ . Можно показать, что каждая пара содержит день d и максимальная рабочая нагрузка с первой недели  $i-1$  до  $i$  недели - это 6 дней.

Единственный раз, когда продолжительность работы превышает 5 дней, - это когда есть неразличимые пары.

В следующем примере есть одна четкая пара, одна неразличимая пара и  $|K4|=1$ .

Рассмотрим применение алгоритма планирования выходных дней на примере. Для чего возьмем таблицу со следующими ежедневными заданиями.

День <sub>j</sub>	1	2	3	4	5	6	7
Дни недели	ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
Требования	3	3	3	3	2	1	0

Максимальное количество заданий на число сотрудников на выходные составляет  $n=2$ , и каждому человеку требуется 1 из 3 выходных, т.е.  $d_1=1$  и  $d_2=3$ . Итак

$$W \geq (3 \times 2)/(3 - 1) = 3,$$

$$W \geq 15/5 = 3,$$

$$W \geq 3.$$

Таким образом, минимальное количество сотрудников  $R$  равно 3 и  $R-n = 1$ . Каждую неделю мы назначаем выходные одному сотруднику. Это приводит к следующему распределению выходных дней для трех сотрудников.

	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С
1	Х	Х																				Х	Х
2								Х	Х														
3															Х	Х							

На данный момент в воскресенье имеется один лишний сотрудник, а в понедельник - три.

день j 1 2 3 4 5 6 7

Деньj	1	2	3	4	5	6	7
Требования	3	0	0	0	0	0	1

Есть 2 пары выходных дней, один отдельный и один неотличимый.

Пара 1: воскресенье - понедельник;

Пара 2: понедельник - понедельник;

Мы будем использовать эти пары каждую неделю.

В списке есть одна неразличимая пара. Разделение сотрудников на категории за первую неделю приводит к следующим категориям: первая пара присваивается сотруднику К4 (по одному в неделю), а вторая пара распределяется между оставшимися двумя сотрудниками (типы К2 и К3).

Применение следующего шага алгоритма дает следующий график.

	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С
1	Х	Х	Х						Х	Х							Х					Х	Х
2			Х					Х	Х	Х						Х	Х						

3		X	X						X					X	X	X						X
---	--	---	---	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	---	---	---	--	--	--	--	--	---

График предусматривает шестидневную рабочую нагрузку для одного сотрудника каждую неделю.

Можно показать, что если все пары выходных дней различны, то максимальная продолжительность рабочего дня составляет 5 дней. В следующем примере все пары выходного дня различны.

Рассмотрим еще один пример, применения алгоритма планирования выходных дней.

Рассмотрим проблему со следующим количеством ежедневных задач.

День <sub>j</sub>	1	2	3	4	5	6	7
Дни недели	ПН	ВТ	СР	ЧТ	ПТ	СБ	ВС
Требования	5	5	5	7	7	3	3

Максимальная потребность в выходных  $n = 3$ , и каждому человеку требуется 3 выходных из 5, т.е.  $d_1 = 3$  и  $d_2 = 5$ . Итак

$$W \geq (5 \times 3)/2 = 8,$$

$$W \geq 35/5 = 7,$$

$$W \geq 7.$$

Таким образом, минимальное количество сотрудников  $R$  равно 8, а  $R - n = 5$ . Мы назначаем выходные дни 5 сотрудникам каждую неделю. Это приводит к следующему распределению выходных дней для восьми сотрудников.

	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В
1	X	X						X	X													X	X
2	X	X						X	X													X	X
3	X	X													X	X						X	X
4	X	X													X	X						X	X
5	X	X													X	X							
6								X	X						X	X							
7								X	X						X	X							
8								X	X													X	X

На данный момент каждый будний день доступно 8 человек, так что излишек  $z_j$  является

День $j$	1	2	3	4	5	6	7
Требования	3	3	3	1	1	0	0

Существует несколько способов, с помощью которых можно выбрать 3 пары выходных дней. Например,

Пара 1: понедельник - вторник;

Пара 2: вторник - среда;

Пара 3: вторник - среда.

Мы будем использовать эти пары каждую неделю.

В списке нет неразличимых пар. Категоризация сотрудников в первую неделю результаты в следующих 4 категориях:

К1: 1, 2

К2: 3, 4, 5

К3: 6, 7, 8

К4: –

Сотрудник 3 находится в паре с 6, 4 с 7 и 5 с 8. Таким образом, нам нужно три пары будних дней, чтобы выделиться.

Категоризация сотрудников на второй неделе дает следующие 4 категории:

К1: 6, 7

К2: 1, 2, 8

К3: 3, 4, 5

К4: –

Сотрудник 1 находится в паре с 3, 2 - с 4, а 8 - с 5.

Категоризация сотрудников на третьей неделе приводит к следующим 4 категориям.

К1: 3, 4

К2: 5, 6, 7

К3: 1, 2, 8

К4: –

Сотрудник 1 находится в паре с 6, 2 - с 5, а 8 - с 7.

Применение следующего шага алгоритма приводит к расписанию, показанному в следующей таблице:

	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В	П	В	С	Ч	П	С	В
1	X	X						X	X		X						X					X	X
2	X	X						X	X			X					X					X	X
3	X	X		X						X					X	X						X	X
4	X	X			X						X				X	X						X	X
5	X	X			X						X				X	X		X					
6			X					X	X						X	X		X					
7				X				X	X						X	X			X				
8				X				X	X			X						X				X	X

Переходы иллюстрируют, как два сотрудника делят пару выходных дней. Все пары различны, поэтому максимальная продолжительность работы составляет 5 дней. Цикличность такого графика составляет 8 недель.

Можно показать, что расписания, генерируемые алгоритмом, всегда удовлетворяют заданным условиям. Из-за того, как выходные распределяются между сотрудниками (равномерно), и из-за первой нижней границы гарантируется, что каждому сотруднику предоставляется не менее  $d_1$  из  $d_2$  выходных. То, что каждый сотрудник работает ровно 5 дней в неделю (с понедельника по воскресенье), сразу следует из алгоритма. То, что ни один сотрудник не работает более 6 дней за один отрезок, определяется тем, что у сотрудника может быть шестидневный рабочий день (но не дольше), когда есть неразделимые пары (если все пары различны, то самый длительный рабочий период составит 5 дней). Если есть неразделимые пары  $(d, d)$ , то день  $d$  должен появиться во всех парах. В худшем случае сотрудник может быть связан с парой  $(j, d)$  на неделе  $i-1$  и парой  $(d, l)$  на неделе  $i$ , где  $j \leq d \leq l$ . В этом случае он

получит по крайней мере выходной день  $d$  на неделе  $i-1$ , а также на неделе  $i$ , которая приводит к шестидневной рабочей нагрузке. Период будет меньше, если либо  $d < j$ , либо  $l < d$ , потому что тогда он получит выходной день  $j$  или день  $l$ .

Таким образом можно показать, что оптимальное расписание может быть определено и оно является циклическим, а алгоритм способен рассчитать это расписание.

### 3.3. Планирование смен

В задаче планирования, рассмотренной в предыдущем разделе, существуют различные шаблоны рабочего расписания в течение цикла [94]. Стоимость назначения сотрудника на определенную смену работы одинакова, и цель состоит в том, чтобы минимизировать общее количество сотрудников.

В этом разделе рассмотрим более общую проблему планирования персонала и будем придерживаться несколько другого подхода. Рассматриваем цикл, который является фиксированным заранее. В определенных условиях цикл может составлять один день, в то время как в других это может быть неделя или несколько недель. В отличие от предыдущего раздела, каждая схема распределения работ в течение цикла имеет свою собственную стоимость, и цель состоит в том, чтобы минимизировать общую стоимость.

Проблему можно сформулировать следующим образом. Заданный цикл состоит из  $m$  временных интервалов или периодов. Продолжительность периодов не обязательно должна быть одинаковой. В течение периода  $i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , наличие  $b_i$  требуется персонал. Число  $b_i$  это, конечно, целое число. Существует  $n$  различных схем смены, и каждому сотруднику назначается одна и только одна схема. Шаблон сдвига  $j$  определяется вектором  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$ . Значение  $a_{ij}$  равно либо 0, либо 1; это 1, если период  $i$  является рабочим периодом, и 0 в противном случае. Пусть  $c_j$  обозначим стоимость назначения человека на смену  $j$  и  $x_j$  (целочисленная) переменная решения,

представляющая количество людей, назначенных на смену  $j$ . Задача минимизации общих затрат на назначение персонала для удовлетворения спроса может быть сформулирована как следующая задача целочисленного программирования [130]:

свести к минимуму  $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

при условии

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m$$

$$x_j \geq 0, \text{ для } j = 1, \dots, n,$$

с помощью  $x_1, \dots, x_n$  целое число. В матричном виде эта целочисленная программа записывается в виде

$$\text{minimize } \bar{c}\bar{x}$$

subject to

$$A\bar{x} \geq \bar{b}$$

$$\bar{x} \geq 0$$

Известно, что такая задача целочисленного программирования в целом является сильно NP-сложной. Однако матрица  $A$  часто может иметь особую структуру.

Например, сдвиг  $j$ ,  $(a_{1j}, \dots, a_{mj})$ , может содержать непрерывный набор из 1 (непрерывный набор из 1 подразумевает, что между 1 нет 0). Однако количество единиц часто может меняться от смены к смене, поскольку возможно, что в некоторые смены приходится работать дольше или больше дней, чем в другие смены.

Рассмотрим пример планирование смен ремонтных бригад. Рассмотрим

ремонтные бригады, которые работают круглосуточно и существует пять режимов смены.

Шаблон	Рабочее время	Всего часов	Стоимость, руб.
1	09-17	8	50
2	18-02	8	60
3	13-19	6	30
4	03-06	3	15
5	06-09	3	16

Требования к бригадам полевой эксплуатации меняются от часа к часу.

Рабочее время	Требования к персоналу
10-11	3
11-12	4
12-13	6
13-14	4
14-15	7
15-16	8
16-17	7
17-18	6
18-19	4
19-20	7
20-21	8

Задача может быть сформулирована как целочисленная программа со следующим с вектором, А матрицей и b вектором:

$$c = (50, 60, 30, 15, 16)$$

$$A = \begin{array}{c|ccccc|}
 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 A = & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 & & & & & 
 \end{array}
 \quad
 b = \begin{array}{c|c|}
 & 3 \\
 & 4 \\
 & 6 \\
 & 4 \\
 & 7 \\
 & 8 \\
 & 7 \\
 & 6 \\
 & 4 \\
 & 7 \\
 & 8 \\
 \hline
 \end{array}$$

Очевидно, что требуется целочисленное решение  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ . Однако решение линейной программной релаксации этой задачи дает решение  $(0,0,8,4,8)$ .

Поскольку это решение является целочисленным, ясно, что оно также оптимально для формулировки целочисленного программирования.

Несмотря на то, что целочисленная программная формулировка общей задачи планирования персонала (с произвольной матрицей 0-1  $A$ ) является NP-трудной, частный случай, когда каждый столбец содержит непрерывный набор 1, прост. Можно показать, что решение задачи линейного программирования всегда является целочисленным.

Есть несколько других важных частных случаев, которые разрешимы за полиномиальное время. В следующем разделе мы обсудим один из них.

### 3.4. Задача циклического укомплектования персонала

Стандартной задачей планирования персонала является цикличность укомплектования персоналом.

Цель состоит в том, чтобы минимизировать затраты на назначение людей в циклический график периода  $m$ , чтобы в течение периода времени  $i$  присутствовало достаточное количество работников, чтобы выполнить требование  $b_i$ , и каждый человек работает смену из  $k$  последовательных периодов и свободен другой  $m - k$  периодов. При этом необходимо обратить внимание, что за периодом  $m$  следует период 1.

Примером может служить  $(5,7)$ -циклическая кадровая задача, когда цикл составляет семь дней, и любой человек работает 5 дней подряд, за которыми следуют два выходных дня. Как описано в предыдущем разделе, эта задача может быть сформулирована как целочисленная программа. В формулировке целочисленного программирования вектор-столбец матрицы  $A$  обозначает возможное назначение смены, которое определяет, какие два дня подряд являются выходными, а какие 5 дней являются рабочими днями. Существует 7 возможных векторов столбцов. Несмотря на то, что в этом случае матрица  $A$  имеет совершенно особую структуру, столбцы не всегда имеют непрерывный набор единиц. Так что это не частный случай примера, описанного в предыдущем разделе.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Стоимость  $c_j$  вектора столбца  $j$ , т.е.  $a_{1j}, \dots, a_{mj}$ , представляет собой стоимость наличия одного человека на работе по соответствующему графику. Вектор  $b$  также является вектором требований, т.е.  $b_1$  обозначает количество людей, которые должны присутствовать в первый день. Целочисленная решающая переменная  $x_j$  представляет количество людей, которые работают в соответствии с расписанием, определенным вектором столбца  $j$ .

Это приводит к задаче целочисленного программирования со специальной структурой.

Особая структура этой задачи целочисленного программирования позволяет эффективно решать ее. На самом деле, можно показать, что решение линейной программной этой задачи очень близко к решению задачи целочисленного программирования. Из-за этого следующий алгоритм приводит к оптимальному решению.

Рассмотрим алгоритм, позволяющий минимизировать затраты при циклическом укомплектовании персоналом).

Шаг 1.

Решаем исходную задачу, чтобы получить  $x_1, \dots, x_n$ .

Если  $x_1, \dots, x_n$  являются целыми числами, то это оптимально для исходной задачи. Задача завершается.

В противном случае перейдите к Шагу 2.

Шаг 2.

Сформулируем две линейные программы  $LP^1$  и  $LP^2$  из ослабления исходной задачи путем добавления соответственно ограничений

$$x_1 + \dots + x_n = [x'_1 + \dots + x'_n]$$

и

$$x_1 + \dots + x_n = [x'_1 + \dots + x'_n].$$

LP<sup>2</sup> всегда будет оптимальное решение, которое является целочисленным.

Если LP<sup>1</sup> не имеет выполнимого решения, то решение LP<sup>2</sup> является оптимальным решением исходной задачи.

Если LP<sup>1</sup> имеет допустимое решение, то оно имеет оптимальное решение, которое является целочисленным, и решение исходной задачи является лучшим из решений LP<sup>1</sup> и LP<sup>2</sup>. Задача завершается.

Следующий пример иллюстрирует использование этого алгоритма.

Пример минимизация затрат при циклическом укомплектовании персоналом.  
Рассмотрим (3,5) -циклическую кадровую проблему

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline A = & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad b = \begin{array}{|c|} \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline 6 \\ \hline 4 \\ \hline 7 \\ \hline \end{array}$$

Вектор затрат равен

$$c = (3.6, 4.8, 5.5, 3.7, 5.2)$$

Применение алгоритма 12.4.1 приводит к следующим результатам.

Шаг 1. Решение задачи релаксации линейного программирования дает

$$x = (1.5, 0, 4.5, 0, 2.5).$$

Значение целевой функции равно 43.15.

Шаг 2. Добавление к исходной задаче ограничения

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 8$$

приводит к проблеме, не имеющей реального решения. Добавление к исходной задаче ограничения

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 9$$

дает  $x = (2, 0, 4, 1, 2)$  с объективной ценностью 43.3. Таким образом, оптимальным решением является  $x = (2, 0, 4, 1, 2)$  с объективной ценностью 43.3.

### 3.5. Применение циклического штатного расписания

В этом разделе мы рассмотрим три применения циклического подбора персонала.

*Первое.* Расписание выходных дней. Рассмотрим следующий частный случай проблемы, рассмотренной в разделе 3.1.2. Каждому сотруднику гарантируется два выходных дня в неделю, включая каждые вторые выходные (неделя начинается с понедельника и заканчивается воскресеньем), и ему не разрешается работать более 6 дней подряд. Эта задача может быть сформулирована как целочисленная программа со следующей матрицей.

$$\begin{array}{cccccccccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots \\ - & - & - & - & - & - & \dots & - & - & - & - & - & - & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & \dots \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots \end{array}$$

1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	...
1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	...
1	1	1	1	1	1	...	0	0	0	0	0	0	...
-	-	-	-	-	-	...	-	-	-	-	-	-	...
1	0	1	1	0	1	...	0	0	0	0	0	0	...
0	1	1	0	1	1	...	0	0	1	1	1	1	...
1	1	0	1	1	1	...	1	1	0	0	1	1	...
1	1	1	1	1	0	...	1	1	1	1	1	0	...
1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	...
1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	...
0	0	0	0	0	0	...	1	1	1	1	1	1	...
-	-	-	-	-	-	...	-	-	-	-	-	-	...
0	0	0	0	0	0	...	1	0	1	1	0	1	...

Число возможных паттернов, как правило, несколько велико, поскольку существует множество паттернов, удовлетворяющих заявленным условиям. Каждая строка в матрице представляет собой день недели. Первые два ряда, два средних ряда и последние два ряда представляют выходные дни. Первая группа столбцов соответствует заданиям с первым и третьим выходными днями, а вторая группа столбцов - заданиям со вторым выходным днем. Эта проблема может быть решена с помощью метода, рассмотренного в предыдущем разделе.

Общую модель, описанную в разделе 3.1.2, также можно рассматривать как циклическую кадровую проблему. Однако это не соответствует структуре, описанной

в разделе 3.1.4, из-за ряда различий. Во-первых, длина цикла не является фиксированной априори. Кроме того, даже если бы длина цикла была фиксированной, было бы трудно описать эту проблему как проблему целочисленного программирования. Количество возможных столбцов очень велико, и их нелегко перечислить.

*Второе.* Циклическое укомплектование штатов сверхурочными. Основная проблема с кадровым обеспечением возникает у оператора связи в виду того, что инфраструктура сетей связи является критически важной и соответственно требует круглосуточного обслуживания и как следствие обеспечение круглосуточного наличия сотрудников для поддержания сети в рабочем состоянии. Предположим, что существуют фиксированные почасовые потребности в персонале  $b_i$ , и три основные рабочие смены, каждая продолжительностью 8 часов: с 8 утра до 16:00, с 16:00 до полуночи и с 00:00 до 8:00.

Для каждой смены возможна сверхурочная работа до дополнительных 8 часов. Необходимо найти кадровое расписание, отвечающее всем кадровым требованиям при минимальных затратах. Матрица ограничений  $A$  состоит из 9 подматриц, каждая из которых содержит 8 строк и 9 столбцов.

$$\left| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right|$$

Подматрица 0 - это матрица со всеми элементами 0. Подматрица 1 - это матрица со всеми элементами 1 и подматрица  $0 \setminus 1$  - это матрица

0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1

Эта проблема может быть решена с помощью линейного программирования.

*Третье.* Циклическое укомплектование штатов линейными штрафами за недоукомплектование и переукомплектование штатов. Предположим, что требования для каждого периода не являются фиксированными. Существует линейный штраф  $c_i$

за недоукомплектованность персоналом и линейный штраф  $c_i$  за перерасход персонала. В штраф  $c_i$  на самом деле может быть отрицательным, так как могут быть некоторые премии в более укомплектование персоналом. Пусть  $x_i$  обозначьте уровень недоукомплектованности персоналом в течение периода  $i$ . Уровень перерасход персонала в течение периода  $i$  тогда  $b_i - (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n) - x_i$ .

Теперь задачу можно сформулировать в виде следующей линейной программы.

свести к минимуму  $\bar{c} \bar{x} + \bar{c}' \bar{x}' + \bar{c}''(\bar{b} - A \bar{x} - \bar{x}')$

при условии

$$A \bar{x} + I \bar{x}' \geq \bar{b}$$

$$\bar{x}, \bar{x}' \geq 0, \text{ где } \bar{x}, \bar{x}' - \text{целое число.}$$

Если  $A$  является матрицей для кадровой проблемы  $(k, m)$  (или любой другой циклической матрицы), проблема может быть решена с помощью алгоритма, описанного в предыдущем разделе, при условии, что проблема ограничена снизу. Оказывается, что задача ограничена снизу тогда и только тогда, когда  $c - c^*A \geq 0$  и  $c - c^* \geq 0$ .

### **3.6. Расписание работы ремонтных бригад**

Проблемы планирования ремонтных бригад очень важны для оператора связи, особенно для магистральной сети, когда сеть протяженная и прежде чем приступить к ремонту, требуется добраться до места. Аналогичная проблема возникает в крупных городах, где чтобы добраться из одной точки города в другую требуется затратить значительное количество времени. И зачастую время в пути может быть больше самого времени выполнения работ. При этом сотрудники заняты как все время в пути, так и на само выполнение необходимых работ. В этом случае базовая модель отличается от моделей, рассмотренных в предыдущих разделах, как и методы решения.

Рассмотрим набор из  $m$  заданий, например, траектории перемещения бригад или сотрудников. Этап перемещения к месту проведения работ характеризуется пунктом отправления и пунктом выполнения работ, а также приблизительным интервалом времени, которое требуется для того чтобы прибыть в точку выполнения работ. Существует набор из  $n$  возможных и допустимых комбинаций этапов перемещения, которые может выполнить одна бригада или сотрудник, например, восстановление магистрального кабеля, проложенного в поле (когда нужно добраться до места повреждения, восстановить кабель и вернуться в точку постоянной дислокации) или устранение повреждений в городе, когда сотрудник с утра выдвигается с работы или из дома и перемещается от одного адреса к другому (число  $n$  обычно очень велико). Во втором случае перемещение между местами повреждения состоит из нескольких этапов перемещения, т.е. специалист выезжает с места работы ( $A$ ) в первую точку выполнения работ  $B$ , после выполнения работ он сразу перемещается к следующей

точке выполнения работ С и так далее. А в изначальную точку он возвращается только лишь при отсутствии других задач, либо при необходимости пополнить расходные материалы или оборудование, необходимых для проведения работ на сети. Любой конкретный этап передвижения может быть частью многих перемещений туда и обратно. Перемещение туда и обратно  $j, j = 1, \dots, n$ , имеет стоимость  $c_j$ . Составление расписания бригады эквивалентно определению того, какие перемещения туда и обратно следует выбирать, а какие нет. Цель состоит в том, чтобы выбрать набор перемещений туда и обратно с минимальной общей стоимостью таким образом, чтобы каждый этап перемещения покрывался ровно один раз одной и только одной бригадой туда и обратно.

Для того, чтобы сформулировать эту задачу планирования бригад в виде целочисленной программы требуется некоторое обозначение. Если отрезок перемещения  $i$  является частью общего маршрута туда и обратно  $j$ , то  $a_{ij}$  является 1, в противном случае  $a_{ij}$  равно 0. Пусть  $x_j$  обозначим 0–1 решающая переменная, которая принимает значение 1, если выбрано путешествие туда и обратно  $j$ , и 0 в противном случае. Задача планирования бригад может быть сформулирована в виде следующей целочисленной программы:

свести к минимуму  $c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n$  при условии

$$a_{11}x_1+ a_{12}x_2+\dots+ a_{1n}x_n= 1$$

$$a_{21}x_1+ a_{22}x_2+\dots+ a_{2n}x_n= 1$$

.....

$$a_{m1}x_1+ a_{m2}x_2+\dots+ a_{mn}x_n= 1$$

для  $x_j \in \{0, 1\}$ , где  $j = 1, \dots, n$ .

Каждый столбец в матрице А является перемещением туда и обратно, а каждая строка - отрезком перемещения, который должен быть пройден ровно один раз за одно перемещение туда и обратно. Таким образом, задача оптимизации состоит в том, чтобы

выбрать с минимальными затратами набор обходов туда и обратно, удовлетворяющий ограничениям. Ограничения в этой задаче часто называют разделением уравнения, и эта задача целочисленного программирования называется задачей разбиения множеств. Для возможного решения  $(x_1, \dots, x_n)$ , переменные, равные 1, называются разделением. В дальнейшем мы обозначим разбиение  $l$  через (3.6)

$$J^l = \{j \mid x_j^l = 1\}. \quad (3.6)$$

Известно, что эта задача является NP-трудной. Для решения этой задачи было предложено множество эвристик, а также схем перечисления (ветвление и граница). Во многих из этих подходов используется концепция цен строк. Вектор

$$\rho^{-l} = (\rho_1^l, \rho_2^l, \dots, \rho_m^l)$$

представляет собой набор допустимых цен строк, соответствующих разделу  $J^l$  удовлетворяющий (3.7)

$$\sum_{i=1}^m \rho_i^l a_{ij} = c_j, \text{ где } j \in J^l \quad (3.7)$$

Цена  $\rho_i^l$  может быть истолковано как оценка стоимости покрытия работы (этап перемещения)  $i$  с использованием решения  $J^l$ . Обычно существует много возможных ценовых векторов для любого заданного раздела.

Цены строк имеют решающее значение для вычисления изменения значение цели, если раздел  $J^1$  преобразуется в раздел  $J^2$ . Если  $Z^1(Z^2)$  обозначает значение цели (3.8), соответствующее разделу  $J^1$  ( $J^2$ ), тогда

$$Z^2 = Z^1 - \sum_{j \in J^2} (\sum_{i=1}^m \rho_i^1 a_{ij} - c_j). \quad (3.8)$$

Количество (3.9)

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^m \rho_i^1 a_{ij} - c_j \quad (3.9)$$

может быть интерпретировано как потенциальная экономия по отношению к первому разделу, которая должна быть получена путем включения столбца  $j$  (3.10).

Можно показать , что если

$$\sum_{i=1}^m \rho_i^1 a_{ij} \leq c_j, \text{ где } j = 1, \dots, n, \quad (3.10)$$

для любого набора возможных цен строк  $\rho^{-1}$  соответствующий разделу  $J^1$ , затем решение  $J^1$  является оптимальным.

Основываясь на концепции цен строк, следующая простая эвристика может быть использована для поиска лучших решений, учитывая раздел  $J^1$  и соответствующий набор допустимых цен строк  $\rho^{-1}$ . Цель состоит в том, чтобы найти лучший раздел  $J^2$ . В эвристике множество  $N$  обозначает индексы столбцов, которые являются кандидатами на включение в  $J^2$ .

Алгоритм 3.6.1 (выбор столбца при разбиении набора).

Шаг 1.

Набор  $J^2 = \emptyset$  и  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ .

Шаг 2.

Вычислим потенциальную экономию по формуле (3.9).

Найдем столбец  $k$  в  $N$  с наибольшей потенциальной экономией (3.11),

$$\sum_{i=1}^m \rho_i^1 a_{ik} - c_k \quad (3.11)$$

Шаг 3.

Для  $i = 1, \dots, m$ , если  $a_{ik} = 1$  набор  $a_{ij} = 0$  для всех  $j \neq k$ .

Шаг 4.

Пусть  $J^2 = J^2 \cup \{k\}$  и  $N = N - \{k\}$ .

Удалим из  $N$  все  $j$ , для которых  $a_{ij} = 0$  для всех  $i = 1, \dots, m$

Шаг 5.

Если  $N = \emptyset$  STOP, в противном случае перейдите к Шагу 2.

Следующий пример иллюстрирует эвристику.

Пример 3.6.2 (Планирование работы бригады, обслуживающей сеть стороннего оператора, O2O). Рассмотрим оператора связи у которого имеется центральное хранилище с расходными материалами и оборудованием и 5 мест возникновения повреждений, см. Рис. 12.1. Перед началом работ со склада должны быть взяты материалы и оборудование, необходимые для проведения ремонтных работ. Предположим, что каждая бригада может обслуживать не более двух точек повреждения за одну поездку. Цель состоит в том, чтобы определить, какая бригада должна отправиться на какое место повреждения, и маршрут движения бригады, который минимизирует общее пройденное расстояние. Каждый столбец в таблице ниже представляет один возможный маршрут движения бригады и  $c_j$  равно общему расстоянию, пройденному за каждый выезд. Например, столбец 6 представляет бригаду, отправляющуюся со склада к месту повреждения 1, затем к месту повреждения 2, а оттуда обратно на склад. Значение  $c_6$  составляет 14, это общее расстояние, пройденное во время поездки.

Маршрут	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$c_j$	8	10	4	4	2	14	10	8	8	10	11	12	6	6	5
	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1

Предположим, мы выбираем  $J^1 = 1, 2, 3, 4, 5$  как наш первый раздел. Набор выполнимых ряд цен равен  $\rho^{-1} = (8, 10, 4, 4, 2)$ . Соответствующая потенциальная

ЭКОНОМИЯ СОСТАВЛЯЕТ

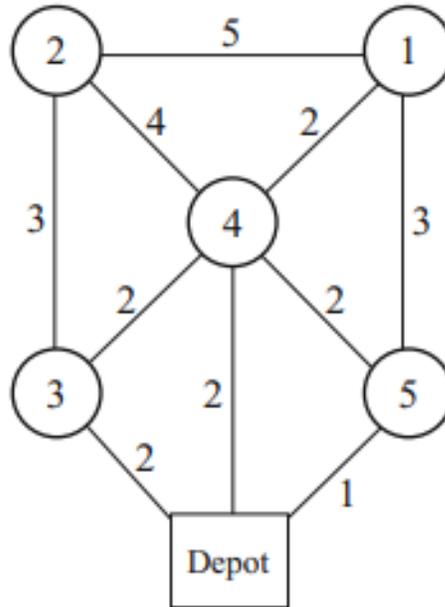


Рис. 3.4. Граф переходов

Маршрутная сеть бригад представлены в таблице ниже. Применение эвристики и разрыв связей путем выбора столбца с наименьшим индексом дает новый раздел  $J^2 = \{6, 13, 5\}$ . Стоимость этого нового раздела составляет  $Z^2 = 22$  по сравнению со стоимостью  $Z_1 = 28$  для первого раздела.

Маршрут	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$c_j$	8	10	4	4	2	14	10	8	8	10	11	12	6	6	5	
	0	0	0	0	0	4	2	4	2	4	3	0	2	0	1	$x_6=1$
$\sigma_j$	-	-	0	0	0	-	-6	-4	-6	-6	-7	-10	2	0	1	$x_{13}=1$
	-	-	-	-	0	-	-	-	-6	-	-	-10	-	-4	-3	$x_5=1$

Возможны многие наборы цен строк. Цены новых строк могут быть определены с помощью следующей процедуры. Ясно, что

$$\rho_1^2 + \rho_2^2 = 14.$$

Выбираем

$$\rho_1^2 = \frac{\rho_1^1}{\rho_1^1 + \rho_2^1} \times c_6 = \frac{8}{8 + 10} \times 14 = 6,222$$

и

$$\rho_2^2 = \frac{\rho_2^1}{\rho_1^1 + \rho_2^1} \times c_6 = \frac{10}{8 + 10} \times 14 = 7,777.$$

Использование цен строк  $\rho^{-2} = (6.2, 7.8, 3, 3, 2)$  потенциальная экономия может быть вычислена, и эвристика дает новый раздел  $J^3 = \{8, 10, 5\}$  с помощью стоимость  $Z_3 = 20$ .

Маршрут	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$c_j$	8	10	4	4	2	14	10	8	8	10	11	12	6	6	5	
	-1.8	-2.2	-1	-1	0	0	-0.8	1.2	0.2	0.8	-0.2	-2.2	0	-1	0	x8=1
$\sigma_j$	-	-2.2	-1	-	0	-6.2	-7	-	-6	0.8	-3.2	-2.2	-3	-1	-3	x10=1
	-	-	-	-	0	-	-	-	-6	-	-	-10	-	-4	-3	x5=1

Использование цен строк  $\rho^{-3} = (5.3, 7.1, 2.9, 2.7, 2)$  мы находим, что вся потенциальная экономия отрицательна, поэтому раздел  $J^3$  является оптимальным.

Маршрут	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$c_j$	8	10	4	4	2	14	10	8	8	10	11	12	6	6	5	
$\sigma_j$	-2.7	-2.9	-1.1	-1.3	0	-1.6	-1.8	0	-0.7	0	-1.2	-2.9	-0.4	-1.1	-0.3	

Когда проблемы становятся очень серьезными, необходимо применять более

сложные подходы, а именно "branch-and-bound переход и привязка", "branch-and-price привязка и цена" и "branch-cut-and-price разделение по цене и цене". Методы ограничения в ветвлении и привязке часто основаны на технике, называемой лагранжевой релаксацией. Метод сокращения и снижения цен сочетает в себе методы разветвления с так называемыми методами разрезания плоскостей и со значительным успехом используется для решения реальных проблем, возникающих в авиационной отрасли.

### **Выводы главы 3**

1. Предложен инженерный метод решения оптимизационной задачи планирования рабочих смен оператора связи, соответствующего текущей технической политике и удовлетворяющего требованиям КзОТ.

2. Исследованы граничные условия, предъявляемые к оператору связи при организации работ.

3. Построена математическая модель и найдены аналитические выражения для составления расписания рабочих смен и расчета необходимого количества сотрудников в каждой смене, исходя из объема прогнозируемых задач.

4. На основе анализа ВВХ показано, что решение поставленной задачи можно добиться не только в краткосрочном периоде, но и определив цикличность распространить на требуемую длительность.

5. Для типичных эксплуатационных задач оператора связи предложены варианты применения построенной математической модели и аналитических выражений.

## **ГЛАВА 4. ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ WFM ПРОВАЙДЕРОВ ЦИФРОВЫХ УСЛУГ**

### **4.1. Открытая цифровая архитектура ODA**

Цель и задачи исследования, сформулированные в главе 1 ориентирована преимущественно на современные архитектуры IT-ландшафта операторов связи, следующие стандартам TMForum – карте бизнес-функций eTOM и архитектуре Framework. При этом в той же главе отмечалось, что непрекращающийся процесс конвергенции информационных и телекоммуникационных технологий и сетей, приведший к лавинообразному расширению набора OTT-сервисов, возможностям IoT и PoT, технологиям дополненной, расширенной, виртуальной реальностей, обусловил появление новых задач управления инфокоммуникациями. Причем сложность этих задач значительно превосходит возможности существующих сегодня систем OSS/BSS. Поэтому в 2020-х годах TMForum начал разработку новой эталонной архитектуры под названием Открытая цифровая архитектура (Open Digital Architecture, ODA). Как показано в разделе 1.2 настоящей диссертации ODA становится сегодня основной эволюционной веткой развития подходов к автоматизации операторов связи и поставщиков цифровых услуг, которая постепенно заменит предлагаемый Framework набор инструментов, правил, подходов к автоматизации операторского бизнеса. Следовательно, разработанные в двух предыдущих главах модели и методы WFM обязаны быть вписаны в ODA и согласованы со всеми ее бизнес-процессами.

Сложность этой задачи обусловлена тем, что ODA учитывает новейшие изменения в инфокоммуникационных технологиях и применение их в бизнесе, и трансформирует эти знания в новейшие инструменты разработки систем автоматизации бизнеса поставщиков цифровых услуг, в подходы к построению систем и OSS- ландшафта. ODA поддерживает следующие основные изменения: переход на облачные решения, смену монолитных программных продуктов на слабо связанные

компоненты, взаимодействующие через открытые стандартные прикладные программные интерфейсы (API).

К тому же WFM (как и вся архитектура ODA) в этой трансформации переориентируется на автоматизацию управления BSS любых поставщиков цифровых услуг, а не только на автоматизацию операторов связи. Под поставщиками цифровых услуг теперь понимают банки, маркет-плейсы, электронные системы бронирования – все бизнесы, которые поддерживаются инфокоммуникационными технологиями и предоставляют любого рода цифровые услуги. Архитектуры предприятий, реализующих бизнесы, очень разнятся. Поэтому фреймворки традиционных WFM/NGOSS/Framework, разработанные исключительно для автоматизации операторов связи, оказались неподходящими для роли «универсальный фреймворк».

Модель жизненного цикла ODA [12] содержит четыре фазы, что обеспечивает понятный принцип согласования программных решений для любого поставщика цифровых услуг и разработчика или интегратора и последующей разработки этих решений. ODA приводит в соответствие автоматизацию поставщиков цифровых услуг с общей практикой отрасли связи и использует полученные в NGOSS и Framework результаты. Сама по себе идея жизненного цикла разработки с четырьмя квадрантами осталась прежней, а вот наполнение поменялось сильно [90], как это показано на рис.4.1. На смену Business Process Framework в квадранте Logical/Developer Viewpoints основным фреймворком для разработки бизнес-процессов становится ODA FA. В квадранте Physical/Developer Viewpoints вместо Application Framework (или карты Telecom Applications Map) предложено использовать типовые программные компоненты, связываемые друг с другом открытыми программными интерфейсами (API). Квадрант Physical/Provider Viewpoints определяет аспекты развёртывания ПО, где основными подходами будут непрерывная интеграция (Continuous Integration, CI) и непрерывная поставка (Continuous Delivery, CD).

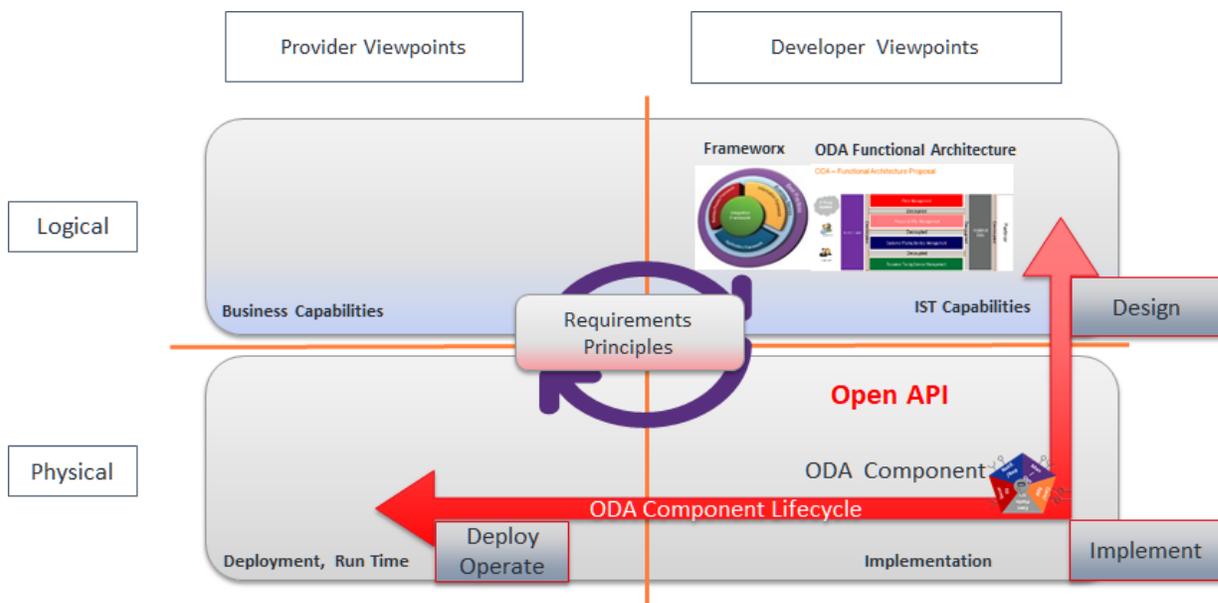


Рис. 4.1. Жизненный цикл ODA

Подчеркнем, что ODA функции карты Business Process Framework берёт на себя Функциональная архитектура (Functional Architecture, FA), традиционно содержащая структурированный набор бизнес-функций предприятия. Функции Applications Framework унаследовала Структура программных приложений (Functional Framework, FF) [89]. Принципиально новое здесь – это собственно сама Функциональная архитектура (FA). В отличие от Business Process Framework (инструмент TMForum Framework), FA имеет другой набор функциональных группировок (блоков). По сути, FA сделали более высокоуровневым фреймворком, учитывающим практически любые бизнес-конфигурации, в отличие от, ориентированных сугубо на «телеком», предыдущих разработок NGOSS/Frameworkx.

Что касается Структуры программных приложений (FF), то новый инструмент нельзя назвать по-настоящему новым. FF – это тот же по смыслу и, в целом, по наполнению (не считая, конечно, текущих обновлений), что и инструменты– карта TAM/Applications Framework предыдущих фреймворков NGOSS/Frameworkx соответственно. FF - это всё тот же структурированный набор функций программного обеспечения, только теперь его структура сильно отличается от структуры FA. Для

сравнения, в TMForum Framework, Business Process Framework (карта бизнес-функций) и Applications Framework (карта функций ПО), информационная модель SID имели похожие организационные структуры.

## **4.2. WFM/ODA в сетях 5G+**

Ре(э)волюционные преобразования технологий в области управления телекоммуникациями со временем идут все быстрее, пытаясь догнать технологические и социальные изменения на самой сети. Практические реализации концепций сетей пост-NGN в ближайшие 3-5 лет, поставят перед операторами связи сложные задачи по управлению [144], особенно в рамках беспроводных сенсорных сетей, сетей на основе облачных и виртуальных технологий, концепции самоконфигурируемых сетей и др. Кроме того, важно отметить, что в настоящее время внедрение когнитивных технологий, таких как машинное обучение, машинное планирование, автоматическое принятие решений, представление знаний и т.п., показывает хорошие результаты, что в перспективе может повысить уровень локального интеллекта и автономности сетевых элементов.

Многие услуги, такие как "умные города", автономные транспортные средства и беспилотные летательные аппараты, предполагается использовать на основе сетей пятого (плюс) поколения [101]. Поэтому в списке наиболее горячих тем TMForum автономные сети (Autonomous Networks, AN), сети на основе намерений (Intend Based Networks, IBN) и технологии цифровых двойников (Digital Twin) [72].

Бизнес, услуги и сетевые операции становятся все более сложными, поскольку услуги становятся все более гетерогенными, динамичными, распределенными и расширяются, включая многочисленные облачные активы и решения сторонних разработчиков и других партнеров. Возможности 5G обещают более дифференцированные услуги, которые лучше удовлетворяют конкретные потребности клиентов, однако они и более сложные. Эта сложность уже превосходит возможности

CSP по управлению, контролю и обеспечению качества обслуживания клиентов, эксплуатации услуг, затрат и производительности сети с помощью современных инструментов и подходов. Как следствие, ручная и статическая автоматизация на основе правил и программ должна уступить место подходам, основанным на моделях и знаниях, которые базируются на намерениях. Последние, в свою очередь, лежат в основе требований к услугам и ресурсам сети. Применяя такие подходы, сервисы могут адаптироваться и развиваться более автономно по мере изменения условий сети, бизнес-целей и требований клиентов. [13]

Цифровые двойники рассматриваются TMForum как многоаспектные инструменты, позволяющие улучшить решения в целом списке направлений, например:

- для оптимизации взаимодействия с клиентами на протяжении всего жизненного цикла.

- для управления оттоком клиентов путем выявления в реальном времени проблем с обслуживанием, вызывающих у клиента недовольство, и обеспечивая понимание времени наступления события и его влияния на стоимость.

- для оптимизации сетевых операций, которые включают планирование сети, операционные процессы, расширение пропускной способности и тестирование новых протоколов безопасности.

Выделим ключевые особенности Production Framework в контексте WFM. Функции блока Production группируются по уровням/доменам и представляют услуги, а не иерархии ресурсов. Традиционные системы управления сетью и OSS имеют интерфейсы, специфичные для конкретной технологии. Это приводит к сильной связи между BSS и OSS из-за того, что клиентские системы BSS должны «понимать» сложные технические спецификации и технические ограничения. Теперь же осуществляется переход к моделям, основанным на намерениях (intend based), с

использованием функций (в информационной модели – это SID Service Configuration), а не только характеристик для описания параметров услуг. В ODA разработана архитектура, в которой взаимодействие осуществляется при помощи открытых API, а модели услуг описываются как "что представляют собой услуги», а не "как они реализуются технически», то есть на основе идеи намерения (intend). Такой подход органичен там, где ресурсы и их конфигурация постоянно меняются и контролируются средой виртуализации, а не OSS/BSS.

Блок ODA Production содержит бизнес-функции, специально поддерживающие элементы процессов в сетях 5G. В частности, в [90] предложены варианты использования ODA для менеджеров продукта, архитекторов и разработчиков систем поддержки сетей 5G. Варианты использования (use cases) основаны на результатах проектов TMForum Catalyst по тематике 5G. Блок ODA Production ориентирован на автоматизацию и эксплуатационную поддержку NaaS (рис. 4.2), управление сетевыми срезами и поддержку услуг гибридного подключения (Hybrid Connectivity Service, HCS).

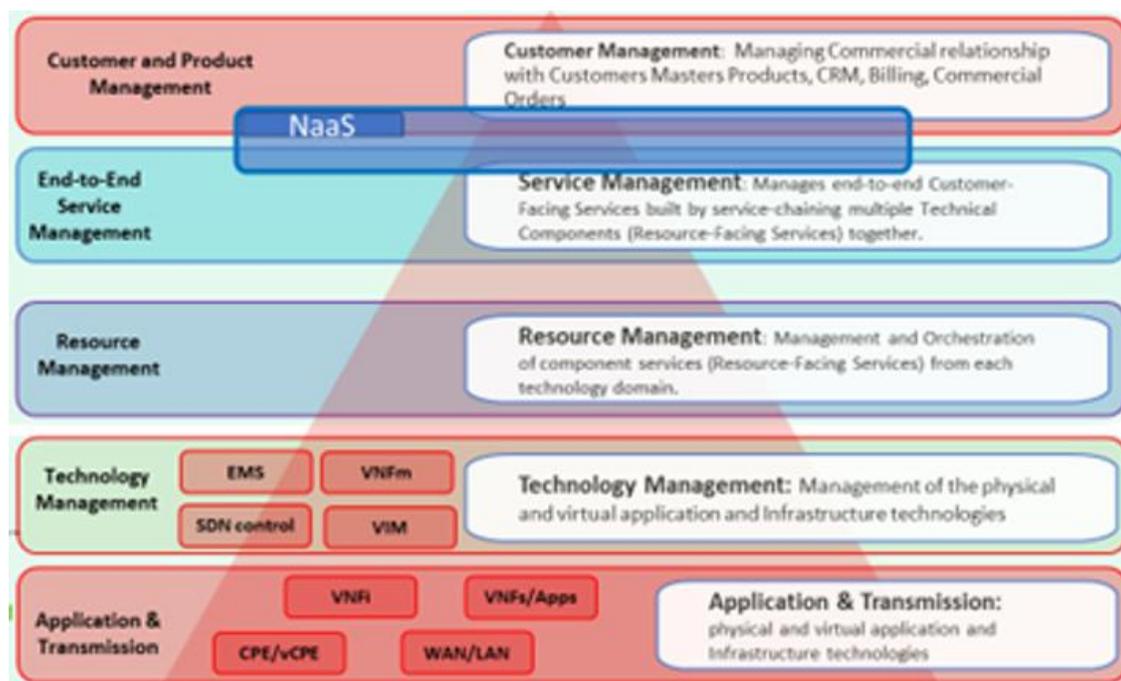


Рис. 4.2. Вариант архитектуры NaaS

Критически важной характеристикой автоматизации в ODA декларируется управление услугами «из конца в конец» (рис. 4.2), что поддерживается реализацией следующих функций блока Production:

- Service Management (Управление услугами) – предоставляет услуги на основе NaaS.

- Resource Management (Управление ресурсами) - объединяет компоненты в Resource Facing Services и Supporting Resource Functions (RF) для поддержки услуг.

- Technology Management (Управление технологиями) - управляет отдельными технологическими доменами с помощью интерфейсов управления. Интерфейсы зависят от технологии и могут зависеть от поставщика.

Эта новая модель обеспечивает переход от технологических доменов с разнообразным набором интерфейсов и технологий управления к услугам, предлагаемым с помощью NaaS, TM Forum Open APIs и Connectivity Service, что позволяет максимально поддерживать сети пятого поколения [1].

Документ [100], построенный на результатах проектов TM Forum (5G Rider on the Storm Catalysts), описывает, как общие атрибуты шаблона сетевого среза могут быть организованы в функции ресурса, поддерживающего услуги подключения на основе намерений. Connectivity-as-a-Service (CaaS) сейчас является одной из ключевых тем TM Forum. Основная цель - создать беспроводные соединения между системами или комплексами на сложных производствах, например, за счёт внедрения возможностей 5G. Это позволит минимизировать разрывы в автоматизации. Ожидается, что к 2030 году средства подключения (connectivity) станут вездесущими и будут встроены в каждый продукт, услугу и приложение.

Для взаимодействия WFM с остальными подсистемами IT-ландшафта в рамках ODA предлагается воспользоваться следующими доменами Connectivity Service Model для сетей 5G+: домен службы подключения (Connectivity Service Domain) - тип

операционного домена, который раскрывает и публикует (в каталоге) Connectivity Services и тип соединения/потоков, которые могут быть установлены через него, и абстрактную модель службы подключения (Connectivity Service abstraction model), например, служба подключения с поддержкой 5G, основанная на домене сегмента сети RAN 5G, открытая доменом службы подключения с использованием API NaaS. Также, блок ODA Production Function предоставляет открытые NaaS-API для реализации услуг. Модель Connectivity Service model реализована как технологически нейтральная для CFS с использованием TMF 909 NaaS API Component Suite.

Важно подчеркнуть, что сеть пятого поколения является своеобразным стержнем, на который нанизываются всё новые и новые возможности. Разработчики ODA, развивая фреймворк, стараются учесть не только технологию сетей пятого поколения, но также учитывают и параллельно развивающиеся технологии и подходы, и свои собственные наработки в рамках реализации проектов Catalyst. Итого, ODA поддерживает виртуальные программно-конфигурируемые сети, сетевую нарезку, она спроектирована таким образом, чтобы быть более облачно-нативной, что означает возможность ее развертывания и управления с использованием облачных технологий и принципов. ODA - это модульная архитектура, которая позволяет более гибко настраивать и интегрировать ее с другими платформами и стандартами. Всё вместе это означает, что она может лучше поддерживать уникальные требования сетей пятого поколения. В контексте развития WFM для сетей 5G/6G интерес представляют также автономные сети (Autonomous Networks, AN), сети на основе намерений (Intend Based Networks, IBN) и технологии цифровых двойников (Digital Twin). Эти наиболее актуальные темы развиваются сегодня в TM Forum. Подход на основе намерений (Intend Based) поддерживает автоматизацию автономных сетей, цифровые двойники наравне с алгоритмами искусственного интеллекта, которые имплементируются в блок интеллектуальной обработки Intelligent Management, управляющий решениями WFM следующего поколения.

### 4.3. Система управления рабочими ресурсами WFM через призму ODA

Теперь, после внимательного исследования архитектуры ODA в двух предыдущих параграфах попробуем совместить ее с моделями и подходами, разработанными в главах 2 и 3. Как уже было отмечено в этих главах, бизнес-процессы WFM нацелены на реализацию поддержки операционной деятельности как выездных сотрудников (курьеры, специалисты по установке оборудования, инженеры аварийных бригад), так и специалистов на местах (внутренние подразделения ИТ, например), как показано на рис. 4.3.

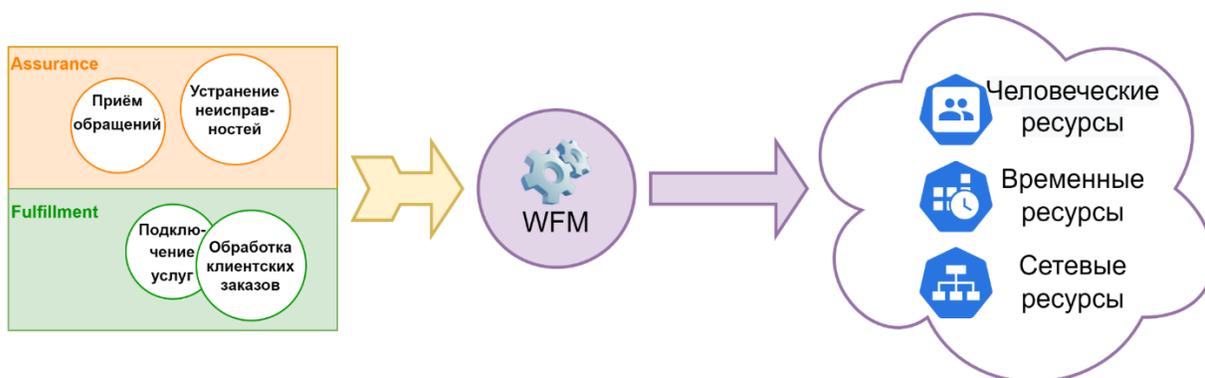


Рис. 4.3. Типовые бизнес-процессы, автоматизируемые системой WFM

Напомним, что системы Workforce Management разрабатывались на основе TM Forum Framework, когда ещё не существовало ODA. Функциональность систем WFM согласно материалам глав 1 и 2 настоящей диссертации может быть традиционно представлена группировками бизнес-функций по Business Process Framework на карте eTOM (рис. 4.4):

- Workforce Management Reporting (Отчетность об управлении персоналом) - позволяет получать детальные отчеты по различным аспектам управления

персоналом, таким как использование ресурсов, продуктивность и оценка эффективности работы.

- Workforce Schedule Management (Управление рабочими расписаниями) - помогает создавать гибкие графики работы, учитывая не только требования компании, но и пожелания сотрудников. Также включает возможности для оптимизации расписаний и управления отсутствиями сотрудников.
- Work Order Analysis (Анализ заказов на работы) - позволяет отслеживать и анализировать выполнение работ, а также эффективность рабочих процессов и затраты на выполнение задач.
- Work Order Assignments & Dispatch (Назначение и распределение заказов на работы) - обеспечивает автоматическую отправку заказов на работы нужным сотрудникам, учитывая их навыки, опыт и доступность.
- Work Order Tracking Management (Управление отслеживанием заказов на работы) - помогает контролировать процесс выполнения заказов на работы, включая отслеживание статусов и своевременную информирование о ходе выполнения работ.
- Workforce Configuration and Setup (Настройка и конфигурирование системы управления персоналом) - обеспечивает настройку системы управления персоналом в соответствии с требованиями компании, включая настройку прав доступа, настройку параметров графиков работы и других настроек.

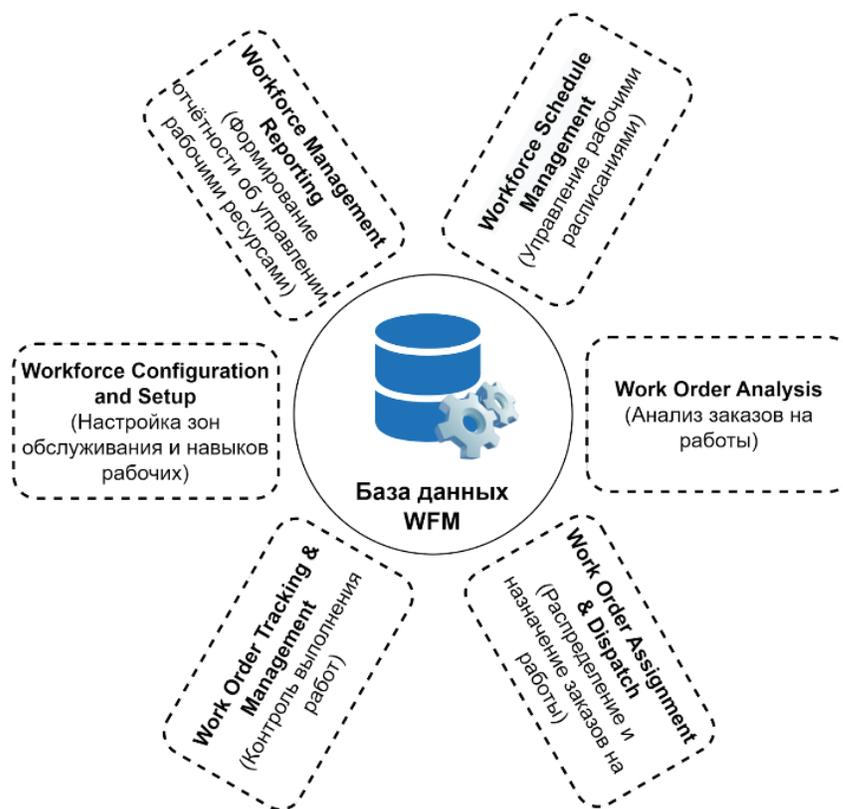


Рис. 4.4. Возможности системы Workforce Management.

Система в автоматическом режиме создаёт расписания выездных специалистов, оптимизирует его на основе различных критериев.

Система позволяет учитывать специализацию участка и специфику работ по наряду, а также настраивать длительность времени выполнения одного наряда (временную сетку) на участке.

Система WFM включает "Справочник работ", где фиксируется длительность каждой работы по нарядам. При формировании наряда система автоматически учитывает суммарное время выполнения всех работ у клиента, что помогает руководителю участка планировать расписание и время работы у клиента более эффективно.

При адаптации системы Workforce Management к открытой цифровой Архитектуре необходимо обеспечить реализацию этих функциональных возможностей.

На самом деле, в данном примере функциональность системы будет несколько расширена за счёт добавления возможностей взаимодействия с клиентом напрямую. В «стандартном» же варианте – система WFM «не должна» заниматься фиксацией обращений клиентов и автоматизацией сопровождения заказов. Здесь это сделано намеренно для того, чтобы более подробно показать особенности работы с инструментами ODA.

Первоначально была выделена функциональность системы WFM, которая послужит основой для дальнейшей разработки.

Для определения границ системы на функциональной архитектуре, следует выбрать группировки бизнес-функций из блоков Functional Architecture. Эти группировки позволят определить бизнес-задачи, выполняемые внутри предприятия, и определить роль ODA-компонента в бизнес-процессе.

Затем, на основе Functional Framework, следует определить конкретные функциональные возможности системы. Functional Framework предоставляет каталог функций программного обеспечения, которые могут быть использованы для реализации системы WFM на основе ODA.

Таким образом, процесс построения системы WFM на основе ODA включает определение бизнес-требований, определение границ системы бизнес-функций по Functional Architecture, определение функциональности на основе Functional Framework и, наконец, разбиение системы на ODA-компоненты. В результате будет сформирована система, состоящая из множества взаимосвязанных по API программных компонентов, способных эффективно поддерживать необходимые бизнес-процессы предприятия.

Все операционные бизнес-функции процессы сконцентрированы в блоках Party Management, Core Commerce Management и Production.

Бизнес-функции, которые могут быть использованы в формировании бизнес-процессов WFM, сконцентрированы в двух блоках: Production и Party Management.

Из блока Production подходят следующие группировки бизнес-функций:

- SM&O Support & Readiness - отвечает за управление инфраструктурой сервисов, обеспечивая наличие необходимой сервисной емкости и готовности поддерживать процессы SM&O (управление, выполнение, обеспечение качества и выставление счетов).
- RM&O Support & Readiness - управление инфраструктурой ресурсов, чтобы гарантировать наличие и готовность соответствующих ресурсов приложений, вычислительных и сетевых ресурсов, необходимых для поддержки процессов Fulfillment, Assurance и Billing, а также для инстанцирования и управления экземплярами ресурсов, и для мониторинга и отчетности по возможностям и затратам отдельных процессов FAB.

В результате выбраны группировки бизнес-функций ODA FA, которые соответствуют бизнес-целям системы WFM. Например, группировка функций SM&O Support & Readiness может быть связана с бизнес-функциями Workforce Schedule Management, Work Order Assignments & Dispatch, Work Order Tracking Management и Workforce Configuration and Setup, так как она относится к управлению задачами, персоналом и обеспечению качества. Группировка функций RM&O Support & Readiness соответствует Workforce Management Reporting и Work Order Analysis, так как она отвечает за мониторинг и отчетность по затратам и возможностям, связанным с процессами WFM. Группировки бизнес-функций из блока Party Management могут быть использованы системой управления рабочей силой в процессах, связанных с клиентскими взаимодействиями, например, согласованием места и времени встречи или формированием рейтинга специалиста на основе обратной связи клиента по выполненным работам.

В качестве основного примера, на рис. 4.5 представлен бизнес-процесс обработки заявки на обслуживание. Этот процесс занимает основное место в рамках WFM, так как он отвечает за выполнение основной функции системы - обеспечение

обслуживания клиентов. Бизнес-процесс включает в себя прием заявок от клиентов, их обработку, назначение исполнителей и контроль выполнения задачи. Качество обработки заявок напрямую влияет на удовлетворенность клиентов и, соответственно, на репутацию поставщика услуг. Поэтому в рамках WFM уделяется особое внимание оптимизации процесса обработки заявок, чтобы минимизировать время выполнения задач и максимизировать качество обслуживания.

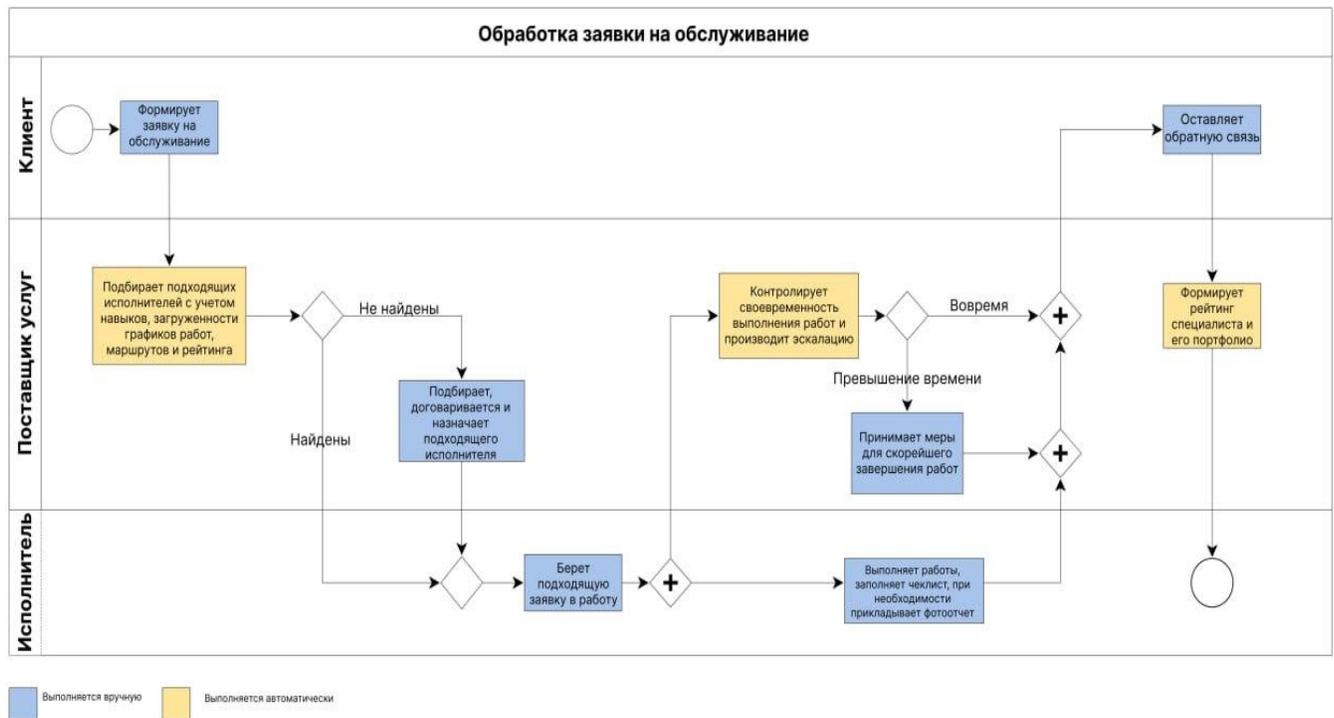


Рис. 4.5. Бизнес-процесс обработки заявки на обслуживание

Первый шаг данного БП включает в себя формирование заявки клиентом на необходимое обслуживание (в рамках WFM это будет подключение услуги по новому договору, дополнительной услуги или отключение услуги). Затем поставщик услуг автоматически подбирает подходящих исполнителей, учитывая их навыки, загруженность, графики работы, маршруты и рейтинг. Если подходящий исполнитель найден, он принимает заявку. Если нет, поставщик услуг вручную подбирает исполнителя для работы.

Исполнитель выполняет работы и заполняет «чеклист», при необходимости прикладывая фотоотчет. Поставщик услуг контролирует своевременность выполнения работ и производит автоматическую эскалацию в случае необходимости. Если время превышено, поставщик услуг принимает меры для скорейшего завершения работ.

После завершения работ клиент оставляет обратную связь. На основе этой обратной связи поставщик услуг формирует рейтинг специалиста и его портфолио автоматически. В целом, эти кейсы позволяют оптимизировать процесс обработки заявок на обслуживание, сократить время на поиск исполнителей, повысить качество работы и улучшить взаимодействие между клиентами и поставщиками услуг.

Для определения необходимых компонентов необходимо изучить функциональную структуру (Functional Framework Functions) в спецификации компонента, где описаны поддерживаемые функции компонента.

В качестве примера будет продемонстрирована выборка функций из спецификации компонента Party Interaction Management (таблица 4.1). Для остальных компонентов системы подобная выборка функций предлагается проделать самостоятельно.

Таблица 4.1. Функции компонента Party Interaction Management

ID функции	Наименование функции	Описание функции	Функции поддомена уровень-1	Функции поддомена уровень-2
163	Contact Queuing (Очередь контактов)	Обеспечивает возможность постановки контакта в очередь до тех пор, пока подходящий сотрудник не станет доступным для работы с контактом.	Welcome and Interaction	Customer Interaction Management

168	Voice Channel Contact Routing (Маршрутизация голосовых контактов)	Обеспечивает возможность клиенту общаться с представителем службы поддержки по телефону, включая запрос информации у клиента (например, с помощью IVR) о характере его запроса и маршрутизацию контакта к наилучшему доступному сотруднику с необходимыми навыками для обработки контакта.	Welcome and Interaction	Customer Interaction Management
196	Customer Interaction Logging (Журналирование взаимодействия с клиентом)	Предоставляет сбор и хранение всех контактов с клиентом через все каналы, включая историю взаимодействия, историю заказов, историю обращений по проблемам, историю взаимодействия по вопросам оплаты, управления делами и т.д.	Welcome and Interaction	Customer Interaction Management

239	Recommendation to Customer Notification (Уведомление о рекомендации клиенту)	Обеспечивает необходимые инструменты для связи с клиентом через предпочитаемый канал, такой как SMS, электронная почта или социальные медиа. Для контактов, поступающих от клиента, самообслуживания или контактного центра, можно получить рекомендацию и гибкий поток действий для выполнения соответствующего обслуживания клиента (например, решение вопросов по кредиту, инициирование спора по счету через самообслуживание).	Welcome and Interaction	Customer Interaction Management
-----	--	---	-------------------------	---------------------------------

Так как одна из основных функций системы управления человеческим ресурсом – это назначение и распределение заказов на работы, то в системе должны быть реализованы возможности для установления связи с клиентом, записи в историю его обращения для передачи в соответствующие участки или подразделения. Помимо этого, должны быть реализованы функции, которые бы смогли автоматизировать

работу контакт-центра в части маршрутизации звонков клиентов к сотрудникам, обладающими необходимыми навыками.

Функции, которые закрывают данные требования, описаны в спецификации компонента Party Interaction Management. Так, например, функция Customer Interaction Logging из таблицы 1 предоставляет сбор и хранение контактов клиента и истории заказов и обращений, закрывая собой одно из требований к функциональности системы.

На рисунке 4.6 приведен ODA-компонент Party Interaction Management с набором необходимыми для взаимодействия с другими компонентами API.

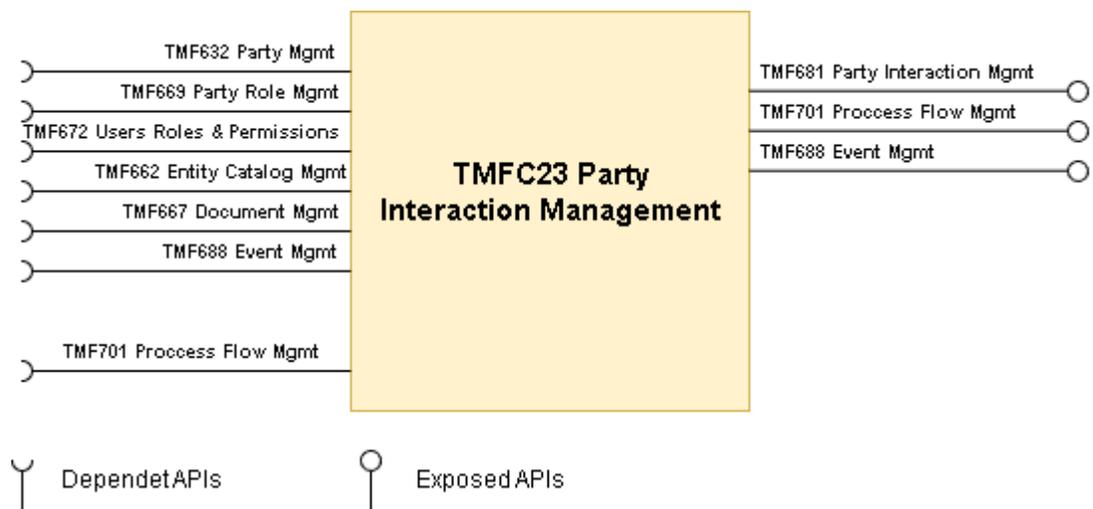


Рис. 4.6. ODA-компонент Party Interaction Management и его API

Список и описания этих API приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Список API компонента Party Interaction Management

TM Forum Open APIs	Краткое описание
Dependent APIs	
TMF 632 Party Mgmt	Предоставляет стандартизированный механизм для управления участниками, такой как создание, обновление, извлечение, удаление и уведомление о событиях.

TM Forum Open APIs	Краткое описание
	Участником может быть физическое лицо или организация, имеющая какие-либо отношения с предприятием.
TMF 699 Party Role Mgt	API управления продажами предоставляет интерфейсы для потенциальных клиентов, возможностей продаж, предложений по продажам и других возможностей управления для поддержки деятельности по продажам для построения отношений с потенциальным клиентом, которым может быть лицо или организация, заинтересованные в товарах и / или услугах, и, возможно, ставшие фактическими клиентами с одним или несколькими подписками.
TMF 672 Users Roles & Permission	Роль пользователя определяется как объект, который определяет набор привилегий, охватывающих различные функции и / или управляемые активы. Когда пользователю назначается определенная роль, ему фактически присваиваются все привилегии, определенные для этого типа роли, и для этого пользователя создаются соответствующие разрешения.
TMF 662 Entity Catalog Mgmt	Каталог сущностей предназначен для предоставления потребителям любого объекта SID через каталог с его спецификацией и политикой, обеспечивающими управление его содержимым. API обеспечивает управление спецификациями объектов и их ассоциациями посредством операций CRUD.
TMF 667 Document Mgmt	Предоставляет операции для синхронизации документов и версий документов в разных системах. Он также предоставляет операции для загрузки документов пользователями, а также для просмотра документов онлайн
Exposed APIs	
TMF 701 Process Flow Management	API ProcessFlow позволяет управлять бизнес-процессами. Он предоставляет всю необходимую информацию для решения бизнес-задачи, требующей ручного действия

TM Forum Open APIs	Краткое описание
TMF 683 Party Interaction Mgmt	Взаимодействие с пользователем собирает информацию о прошлых взаимодействиях, чтобы повторно использовать ее в будущем. Это позволяет агентам лучше обслуживать пользователей, зная этапы, которые они прошли. Это также позволяет клиентам лучше видеть выполненные ими действия и то, как они взаимодействовали с нами.
TMF 688 Event	API управления событиями предоставляет стандартизированный клиентский интерфейс к системе управления корпоративными событиями для создания, управления и получения событий, связанных с обслуживанием, для (индикативного) управления рабочими процессами автоматизации, уведомления других поставщиков услуг о перебоях в обслуживании и нарушениях SLA, запуска создания заявок на устранение неполадок и включения более сложных сценариев взаимодействия между системами управления. API управления событиями также можно использовать для передачи событий бизнес-уровня в поддержку других процессов.

В таблице 4.3 представлены компоненты, выбранные для системы WFM на основе выделенных функций, и их описание.

Таблица 4.3. ODA-компоненты для системы WFM

Название компонента	Краткое описание функциональности
Intelligence Management	
Recommendation Management	Управление рекомендациями обеспечивает функциональность для принятия решений, например, обработку клиентов и действий для каждой конкретной ситуации на основе наблюдения за тем, что клиент испытывает в данный момент.
Party Management Block	

TMFC028 Party Management	Отвечает за управление данными о клиентах, их идентификацию и аутентификацию. Обеспечивает создание и редактирование профилей клиентов
Party Problem Management	Управление проблемами, сообщенными клиентами, разрешение этих проблем, предоставление информации о статусе проблемы
Production Block	
Appointment management	Обеспечивает стандартные механизмы организации встреч с учётом свободных временных окон (слотов). В качестве параметров используется дата, время, место встречи.
TMFC014 Location Management	Отвечает за управление информацией о местоположениях, например: адреса, принадлежность к различным зонам и т.д
Decoupling And Integration	
TMFC019 Event Management	Компонент управления сообщениями, который отвечает за обработку событий, происходящих из компонентов. Обработка записей о деятельности включает моделирование сообщений о событиях, проверку синтаксиса и форматирование сообщений о событиях и отправку/получение сообщений между компонентами.

В результате получена система, разбитая на программные компоненты. Необходимые ODA-компоненты, которые соответствуют требованиям системы, были найдены в блоках Production и Party Management. Для обеспечения взаимодействия между программными блоками были включены все компоненты из блоков Engagement Management и Decoupling And Integration.

Теперь необходимо встроить данные ODA-компоненты в бизнес-процесс. Последовательность действий компонентов в бизнес-процессе представлена следующим образом (рис. 4.7):

Когда клиент обращается к оператору связи для подключения услуги, первым компонентом, с которым он взаимодействует, является Party Interaction Management. Он определяет, является ли клиент новым или существующим, чтобы предложить соответствующие действия. Если клиент уже зарегистрирован, информация передается в компонент Digital Identity Management для аутентификации и определения роли клиента.

Digital Identity Management авторизует клиента и передает информацию об идентификации в компонент Party Management. Основная задача компонента Party Management заключается в управлении профилем клиента. Если клиент сообщает о проблеме, запрос автоматически связывается с его профилем в Party Management. Затем компонент Party Problem Management отслеживает этот запрос, обрабатывает его и предоставляет информацию о проблемах и их причинах для подробного описания заявки. Он также помогает в оценке приоритетности обращения и выборе соответствующего исполнителя.

Компоненты Appointment Management и Location Management также участвуют в выборе подходящего исполнителя. Appointment Management использует информацию о доступности исполнителей и временных слотах, а Location Management обрабатывает географические данные клиента для определения маршрута и удаленности адреса. При передаче параметров (дата, время, адрес клиента) от Party Management, Appointment Management назначает исполнителя для выезда к клиенту.

После того, как заявка принята в работу исполнителем, Service Assurance Management контролирует своевременность выполнения работ и предпринимает упреждающие и реактивные действия для своевременного завершения работ, если это необходимо. Результат работы передается в компонент для формирования рейтинга

исполнителя. Recommendation Management, на основе обратной связи от клиента о качестве выполненных работ, формирует рейтинг и портфолио специалиста.

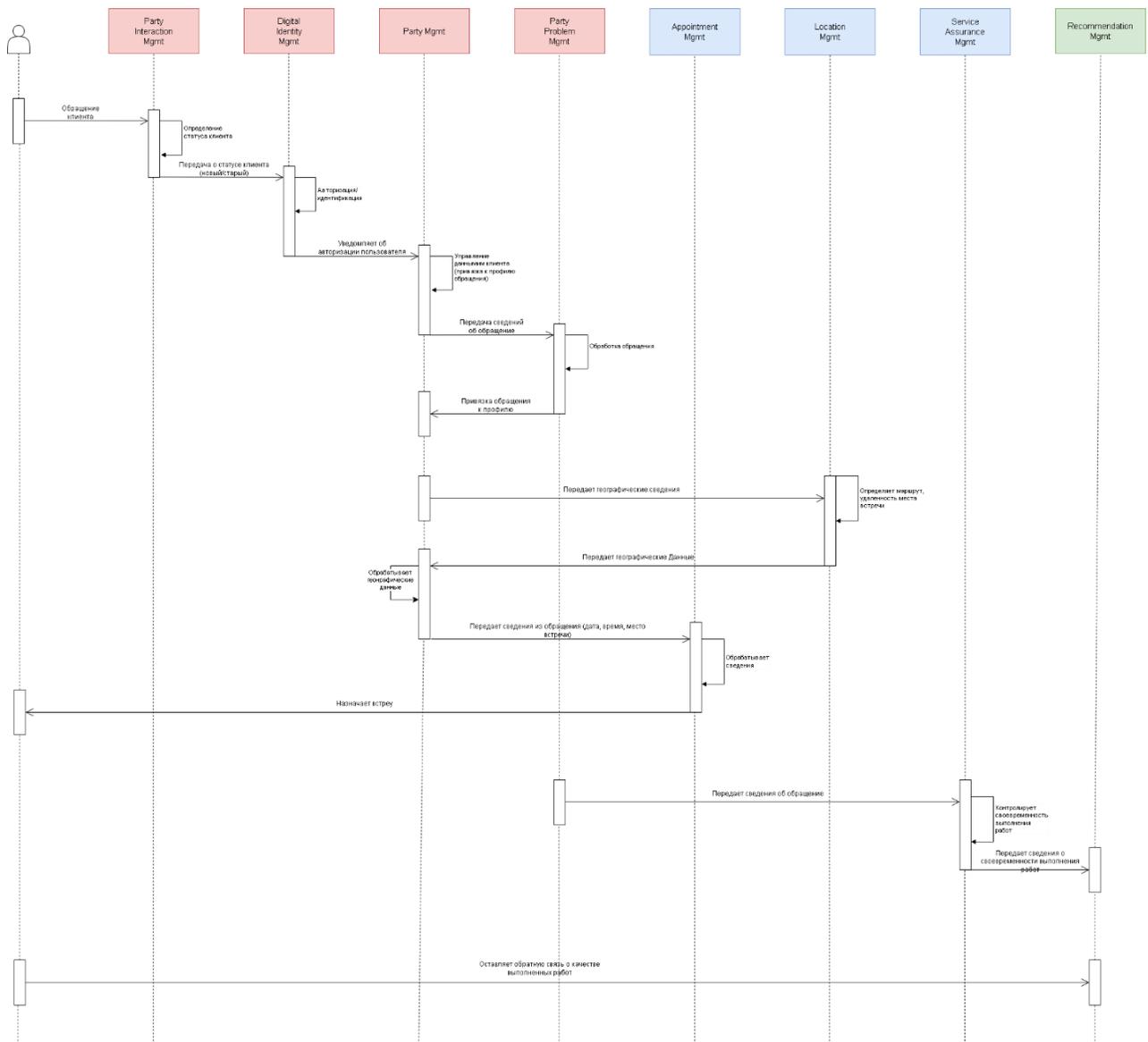


Рис. 4.7. Диаграмма последовательности ODA-компонентов в бизнес-процессе обработки заявки на обслуживание

Данная диаграмма последовательности построена на основе бизнес-функций компонентов по карте eTOM.

После того, как была определена последовательность действий компонентов, необходимо определить, как они будут взаимодействовать между собой, и как будут происходить процессы между ними и блоками.

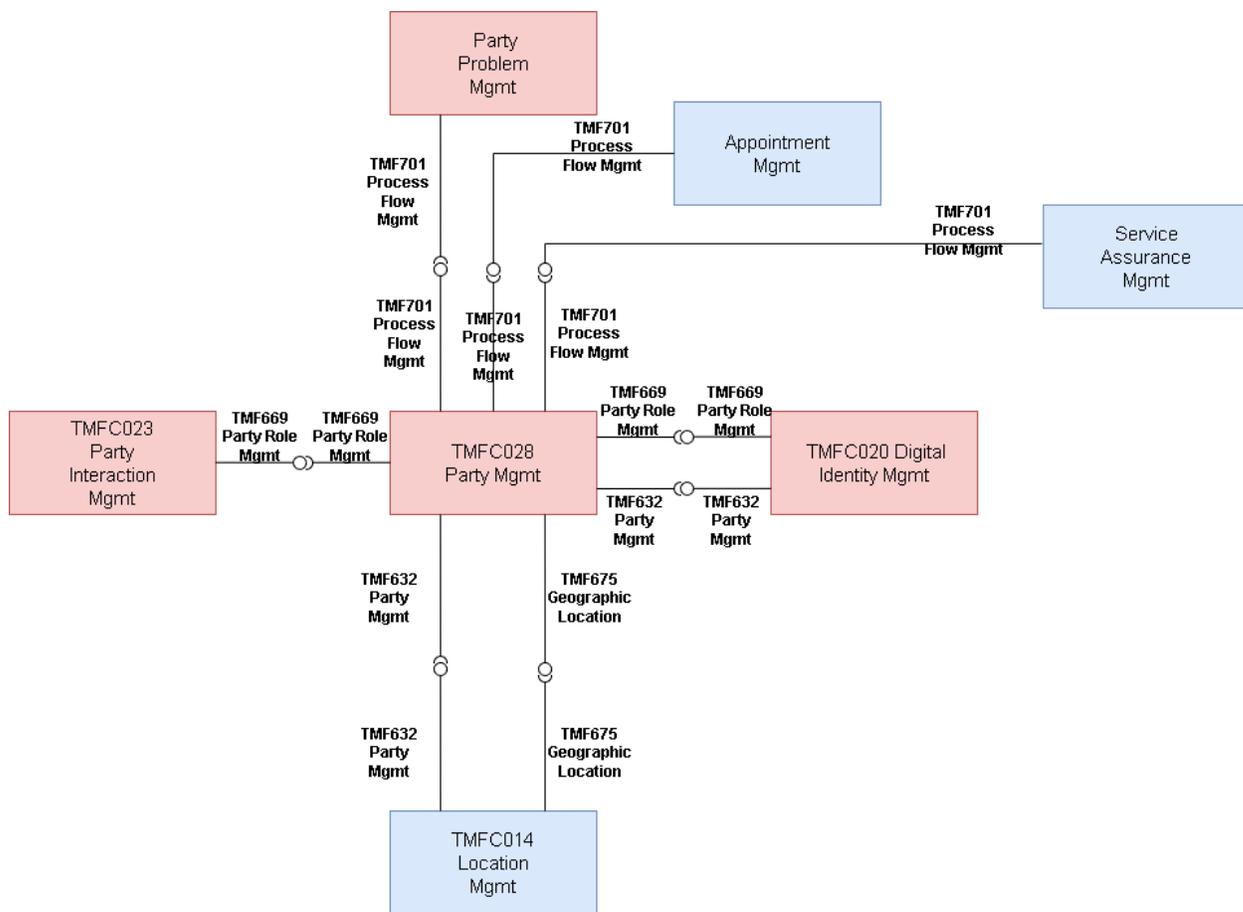


Рис. 4.8. Взаимодействие выделенных для системы WFM ODA-компонентов

На рисунке 4.8 изображено взаимодействие ODA-компонентов посредством API. Отображены только компоненты, отвечающие за операционные процессы внутри обсуждаемого бизнес-процесса. Чтобы программные блоки могли взаимодействовать друг с другом, необходимо сопоставить dependent API одного компонента с exposed API другого.

Чтобы получить сведения о партнерской роли, Party Interaction с помощью API TMF669 связывается с Party Mgmt. На основе этих данных определяются доступные действия для клиента. Также Party Mgmt при помощи TMF632 передает сведения с данными клиента, чтобы в ответ получить его географический адрес (по TMF 675).

Если программному блоку требуется передать не какую-либо информацию, а запустить процесс, то это осуществляется при помощи TMF701 Process Flow Mgmt. Например, Party Mgmt сформировал профиль клиента, и требуется привязать

обращение. Тогда он при помощи TMF701 запускает процесс, передающийся на дальнейшую обработку Party Problem Mgmt.

Если компонент генерирует какое-либо событие, то оно сначала обрабатывается в Event Mgmt, и затем передается на обработку соответствующему компоненту. Так, например, после завершения наряда исполнителем Service Assurance Mgmt создает событие, уведомляющее о сроках завершения работ сотрудником. Event Mgmt это обрабатывает и через API TMF688 передает компоненту Recommendation Mgmt, который уже составляет рейтинг на сотрудника

API работает через HTTP-запросы, где GET используется для получения информации, POST — для создания новых ресурсов, PUT — для обновления существующих ресурсов и DELETE — для удаления ресурсов. Все созданные события обрабатываются в компоненте Event Management, после чего передаются необходимым компонентам для дальнейших действий.

#### **4.4. Инженерные задачи WFM в сетях пост-NGN**

Математические модели двух предыдущих глав и изученный в этой главе подход к WFM в архитектуре ODA предоставляют научную основу для решения практических задач применения WFM в сетях связи. К этим задачам относятся следующие.

##### 4.4.1. Проблемы с эффективностью труда

Мировой опыт показывает, что некоторые компании платят своим сотрудникам за то время, что они фактически не работали – например, по данным Американской ассоциации заработной платы (American Payroll Association), в США 75% предприятий сталкивались с этой проблемой. Россия – не исключение. Например, одна российская федеральная сеть теряла до 10 000 рабочих часов в день за счет опаздывающих сотрудников. Эта проблема чревата не только потерянными миллионами для работодателей, но и ухудшением качества работы.

Для оператора связи также актуален вопрос оптимизации нахождения сотрудника

в пути к времени производительной работы. Наиболее остро этот вопрос стоит в крупных городах. Но и про удаленные населенные пункты нельзя забывать и предусмотреть алгоритмы сокращения неэффективных затрат на дорогу.

Возвращаясь к мегаполисам необходимо в алгоритме учитывать не только время в пути, исходя из расстояния, но и так называемые пробки на дорогах, которые в разы увеличивают время непроизводительного перемещения сотрудников от одной точки проведения работ к другой.

Таким образом даже в этой части получается многофакторная задача оптимизация непроизводительных затрат к реальным работам, проводимым на сети. Современные WFM системы должны предлагать набор инструментов для отслеживания нахождения персонала в любой момент времени – от биометрического контроля до специальных мобильных приложений. Должна обеспечить автоматизированный учет и контроль рабочего времени, что позволит сэкономить значительные суммы на ФОТ, оперативно обнаружить не вышедшего на работу и сотрудника и найти ему замену, контролировать качество выполняемой работы.

#### 4.4.2. Оперативное решение проблем, возникающих при выполнении плана работ.

В каждой компании возникали ситуации с недополученной прибылью, когда случился наплыв клиентов, и было не понятно, где найти дополнительных людей, чтобы обслужить всех. Например, связанных с выборами, олимпийскими играми и другими, когда в достаточно сжатые сроки требовалось подключить большое количество объектов.

Или другая ситуация, когда из-за погодных явлений и катаклизмов возникали массовые повреждения и соответственно необходимо приоритизировать задачи, а также увеличивать ресурсы для решения всех возникших проблем.

Или менее масштабное, когда из-за болезни часть сотрудников не выходили на работу и приходилось оперативно пересматривать план работ.

Современные системы WFM должны предлагать функционал по аналитики, который позволил бы проанализировать исторические данные по сканам, инцидентам, количеству обращений и др. за соответствующий период и спрогнозировать поведение на тот или иной промежуток времени, рассчитав при этом потребность в персонале. «В связи с этим расходы на ФОТ в это время могут увеличиться до 25%. Правильная аналитика, прогноз и расчет потребностей в персонале может уменьшить этот показатель до 8%». То же касается и оперативного поиска замены заболевшему сотруднику. В случае неявки основного работника, система должна оперативно найти ему замену среди доступных и подходящих по квалификации сотрудников.

#### 4.4.3. Задача соблюдение законов, правил и регламентов

Работа с персоналом от года к году все пристальнее контролируется государством и за нарушение этих законов наказания становятся все более серьезными, чтобы не учитывать эти требования при планировании работ сотрудников. Ведение учета рабочих часов сотрудников «на бумажке» или по-старинному в Excel чревато не только дополнительными расходами на сверхурочные, но и потенциальными штрафами за переработки, не соответствующие нормам ТК. Таким образом WFM системы должны и это учитывать и корректировать часы сотрудников в рамках суммированного учета, а также состав работников, когда по регламенту работу не может выполнять один сотрудник.

Это позволит не только сократить затраты на сверхурочные на 0.7%, но и автоматически контролировать выполнение требований ТК, правил и регламентов.

#### 4.4.4. Вопрос оптимизации ФОТ

Во всем мире затраты на фонд оплаты труда входят в Топ-3 основных расходов оператора связи. Разработанная в главе 3 система по управлению и автоматизации рабочих графиков сотрудников должна помочь сократить эту цифру на 10% и более [74]. Примером может быть компания М.Видео, которая в 2015 году внедрила WFM-

систему и гибкие графики для своих сотрудников. В результате было сэкономлено более 500 миллионов рублей в год. Приятным бонусом был тот факт, что снизилась текучка кадров и выросла эффективность персонала.

#### 4.4.5. Возможность сосредоточиться на бизнесе

Все больше и больше компаний стараются оптимизировать HR-процессы и административные задачи, чтобы не тратить на них время, а посвящать его именно развитию и росту своего основного бизнеса. Возьмем любую компанию оператора связи. У его руководителя есть множество обязанностей – принять по развитию сети, проконтролировать динамику продаж и оттока клиентов, убедиться в том, что предлагаемые тарифы и услуги находятся в тренде современных реалий, открыть дополнительные точки взаимодействия с клиентами и многое другое. И чтобы сосредоточиться на таких важных вопросах, руководитель должен быть уверен, что вопросы составления графика работ и состава персонала, отслеживание затрат на ФОТ и обеспечение соблюдения требований законодательства закрыт или во всяком случае не требует глубокого погружения в этот вопрос. Внедрение WFM-решения позволяет решить эти проблемы, предоставить актуальную и аргументированную картину, а также сократить время, потраченное на составление расписания до минимума. По оценкам экспертов, общее количество человеко-часов, требуемое для управления расписанием сотрудников среднего оператора связи, с помощью системы составляет максимум 4 часа в неделю. Сегодня в мире бизнеса побеждают те компании, которые не просто развивают свою сеть, предлагают новые услуги, а те, кто грамотно увеличивает собственную эффективность, сокращая затраты на эксплуатацию. Представленные в диссертации WFM-системы являются как раз таким инструментом, позволяющим оптимизировать работу персонала предприятия и значительно сократить расходы на ФОТ.

## **Выводы главы 4**

1. Проанализированы перспективные подходы к ИТ-ландшафту телекоммуникационного оператора, включающие разработанные в диссертации методы и математические модели построения WFM.

2. Проведен натурный эксперимент WFM операторов перспективных телекоммуникационных сетей 4G/5G, ориентированный на открытую цифровую архитектуру ODA. Результаты эксперимента подтвердили основные положения, выносимые на защиту.

3. Проверены основные допущения, положенные в основу математических моделей WFM в главах 2 и 3. Подтверждена корректность сделанных выводов и соответствие архитектуре ODA сетей 4G/5G

4. Обоснована целесообразность использования разработанных в диссертации методов и моделей расчета и проектирования WFM в сетях пост-NGN.

5. Результаты исследований были применены для построения систем WFM в составе OSS/BSS на сетях операторов связи, а также в ряде проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных предприятий связи. Акты о внедрении представлены в Приложении 1 к диссертационной работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие мультисервисных сетей связи 5G в свою очередь поставила перед систем эксплуатационного управления качественно новые задачи по их управлению. Одна из таких задач заключается в ином взгляде на организацию работ эксплуатационного персонала оператора связи, чтобы с одной стороны не допустить неконтролируемый рост штата сотрудников, а с другой выдержать необходимые показатели качества (SLA). В диссертационной работе показано, что вопрос управления персоналом до сих пор актуален и затрагивает различные спектры деятельности человека: эффективная оптимизация и управление кадровым планированием; планирование оптимального штата для поддержания работы компании; прогнозирование будущих потребностей сотрудников с учетом увольнений, больничных и отпусков и т.п.

При этом рассматриваемые подходы ориентированы на достижения конкретного результата: выполнения большего объема работ, сокращения затрат, выпуск большего количества изделий (автомобилей, устройств) и т.п. Что в текущих условиях эксплуатации сетей связи 5G не всегда эффективно, так как задачи зависят от вероятности задержки в выполнении текущих задач WFM, качества и надежности инсталляций и эксплуатационного сопровождения инфокоммуникационных услуг SLA (Service Level Agreement). Поэтому в рамках своей работы были предложены модели и методы управления персоналом телекоммуникационного оператора в условиях перехода к сетям 5g на основе вероятностно-временных характеристик.

В диссертационной работе предложена новая трехфазная математическая модель WFM, в которой определены ключевые вероятностно-временные характеристики управления работами. На основе этой модели приведена методика расчета, позволяющая оптимизировать расписание рабочих смен и определять необходимое количество персонала для каждой смены с учётом прогнозируемого объёма задач.

Были разработаны аналитические методы для расчета ВВХ при нормальном, равномерном и экспоненциальном распределениях времени выполнения задач.

Предложено решение задачи оптимизации стратегии управления персоналом при заданных ограничениях и с учётом ряда ключевых факторов и метрик эффективности.

Разработаны инженерные методы тестирования WFM у операторов связи перспективных телекоммуникационных сетей 4G/5G, которые подтвердили ключевые тезисы, выносимые на защиту. Также практически подтверждена целесообразность применения предложенных методов и моделей в сетях пост-NGN.

Численные оценки выигрыша от применения результатов диссертации выражаются в сокращении численности персонала оператора связи и улучшении и/или сохранении параметров QoS. В общем виде рассчитать их не получилось, т.к. результат зависел от того, насколько эффективно работали процессы WFM у оператора до применения разработанных в диссертации методов и моделей.

Поэтому были рассчитаны конкретные результаты использования предложенных методов и моделей:

- у одного современного оператора связи сокращение персонала составило 17% при сохранении всех показателей SLA;

- в другой компании было составлено расписание для Call-центра, что позволило сократить среднее время ответа оператора на 20% при той же численности персонала за счет перераспределения смен по модели в главе 3;

- еще в одной компании использование предложенной методики позволило сократить затраты на персонал на 9%, за счет перераспределения работ между сотрудниками разной квалификации и сокращения переработок.

Таким образом предложенные модели и методы управления персоналом нашли свое практическое применение при разработке WFM систем у операторов связи, а также в ряде других научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций в области связи, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Рекомендации:

1. Предложенную аналитическую трехфазную модель управления персоналом телекоммуникационного оператора мультисервисных сетей рекомендуется использовать при разработке систем WFM для автоматизации сквозных процессов и получения максимального эффекта от внедрения системы WFM на сети.

2. Полученные результаты оптимизации выбора стратегии WFM рекомендуются к использованию на сетях связи пятого поколения, где используются различные технологии и поставщики оборудования, а также предоставляются различные сервисы для клиентов.

3. Разработанный метод выбора подхода управления эксплуатационным персоналом рекомендуется к использованию при замене существующих у оператора связи импортных систем WFM.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшее исследование предполагается вести в следующих направлениях:

1. Выполнить анализ других методов оптимизации и сравнить их с предложенным методом множителей Лагранжа, в результате данных исследований возможно будет подобран метод оптимизации дающий больший эффект как по результатам, так и по производительности системы.

2. Проработать вопрос применения искусственного интеллекта не только на этапе анализа результатов выполнения работ, но и на этапе прогнозирования количества поступающих задач в зависимости от различных входных параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин, А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики /А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 5. – С. 45-49.
2. Бутенко, В.В. Сети 5G/ИМТ-2020&IoT – основа цифровой трансформации. /В.В. Бутенко, В.В. Веерпалу, Е. Девяткин, Д. Федоров. // Электросвязь. - 2019. - №12. - С. 4-9.
3. Васильев, А.Б. Тестирование сетей связи следующего поколения / А.Б. Васильев, Д.В. Тарасов, Д.В. Андреев, А.Е. Кучерявый – М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. – 140 с.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. — 6-е изд. стер. / Е. С. Вентцель. — М.: Высш. шк., 1999. — 576 с.
5. Вигерс, К. Разработка требований к программному обеспечению / К. Ви-герс, Д. Битти. – 3-е изд., дополненное. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 736 с.
6. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.
7. Волков А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПбГУТ / Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Парамонов А.И., Владимиров С.С., Фокин Г.А., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О., Анваржонов Б.Н. // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.
8. Волков, А.Н. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2020. - Том 8. № 2. - С. 32-43. - DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
9. Галимянов А.Ф., Галимянов Ф.А. Архитектура информационных систем / А. Ф. Галимянов, Ф. А. Галимянов. – Казань: Казан. ун-т, 2019. – 117 с

10. Гольдштейн А., Чумачкова Е., Никулин В. Прикладная геометрия для Workforce Management // Технологии и средства связи. 2013. No 2. С. 50 — 51
11. Гольдштейн А.Б. Концептуальные аспекты управления сетями пятого поколения // «Вестник связи», № 5, 2019.
12. Гольдштейн А.Б., Кисляков С.В. Концепция открытой цифровой архитектуры: эволюция или революция? // Вестник связи. 2022. №.6. С. 21 — 25.
13. Гольдштейн А.Б., Кисляков С.В. Цифровой двойник для управления сетью связи. // Вестник связи, №7, 2021.
14. Гольдштейн А.Б., Кисляков С.В., Садовский И.В. Школа Workforce Management для контакт-центра // Мобильные телекоммуникации. 2017. No 2. С. 10 — 14
15. Гольдштейн Б.С. Инфокоммуникационные сети и системы // СПб.: БХВ-Петербург, 2024
16. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2013. — 162 с.
17. Гольдштейн, Б. С. Сети связи: учебник для вузов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. — СПб.: БХВ, 2010. — 400 с.
18. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003.
19. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи. — М.: Связь, 1977.
20. Ким, Дж. О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж. О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 215 с.
21. Коберн, А. Современные методы описания функциональных требований к системам / А. Коберн. — Москва : Издательство «Лори», 2002. — 288 с.
22. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. — Москва : Физматлит, 2006. — 816 с.
23. Кучерявый А. Е. Сети связи с ультрамалыми задержками // Труды НИИР. 2019. № 1. С. 69–74.

24. Кучерявый А.Е. Самоорганизующиеся сети. / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый. – СПб: Типография «Любавич», 2011. – 312 с.
25. Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Киричек Р.В. Сети связи 2030 . Электросвязь. 2018. № 11. С. 52-56.
26. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
27. Кучерявый, А. Е. Тактильный Интернет / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Сети и линии связи: прошлое, настоящее, будущее. Научные чтения памяти А. С. Попова, посвященные Дню радио — празднику работников всех отраслей связи: сборник материалов. — 2016. — С. 142–146.
28. Кучерявый, А. Е. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А. Е. Кучерявый, М. А. Маколкина, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2016. — № 1. — С. 44–46.
29. Кучерявый, А.Е. Сети связи ожидает блестящее наукоемкое будущее. Электросвязь. - 2022. - № 1. - С. 3-5.
30. Кучерявый, А.Е. Сети связи с ультрамалыми задержками / А.Е. Кучерявый // Труды НИИР. – 2019. - №1. – С. 69-74.
31. Лихтциндер, Б. Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). – М.: Горячая Линия - Телеком, 2019. – 290 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-0742-3.
32. Мардер Н.С. Блоги для неандертальцев: проблемы современных телекоммуникаций России. — М.: Прозаик, 2012. — 208 с.
33. Нгуен К.З., Б.С. Гольдштейн, В.С. Елагин, А.В. Онуфриенко. Когнитивная модель на базе теории игр для динамического управления производительностью в программно-конфигурируемых сетях управления – Т-Comm, 2019 №8, стр. 28-35.
34. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

35. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование новых принципов построения сетей связи 6G и предоставления перспективных услуг телеприсутствия». А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С.А. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, В.С. Елагин, Н.А. Чистова, Р.И. Пупцев, О.И. Ворожейкина, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Е.В. Макарова, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов, Н.И. Карташова, Н.Н. Громова. – СПб. – 2022.
36. Поршнева С.В. Математические модели информационных потоков в высокоскоростных магистральных интернет-каналах. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2016. – 232 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-0508-5.
37. Самуйлов, К. Е. Бизнес-процессы и информационные технологии в управлении телекоммуникационными компаниями / К. Е. Самуйлов, А. В. Чукарин, Н. В. Яркина. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 512 с.
38. Самуйлов, К. Е. Чукарин А. В., Яркина Н. В.. Введение в управление инфокоммуникациями: учеб. пособие / К. Е. Самуйлов, Н. В. Серебренникова, А. В. Чукарин, Н. В. Яркина. – М.: РУДН, 2008. – 87 с.
39. Саттон Ричард С., Барто Эндрю Г. Обучение с подкреплением. — 2-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 552 с.
40. Соколов Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи. — СПб.: Техника связи, 2012. — 428 с.
41. Степанов С.Н., Степанов М.С. Модели и методы оценки характеристик передачи данных. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2023. – 176 с.: ил. – ISBN 978-5-9912-1038-6.
42. Тархов Д.А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы. – М.: Радиотехника, 2005. – 256 с.

- 43.Феноменов, М.А. Методы теории хаоса для задач динамического управления контакт-центрами / А.Б. Гольдштейн, С.В. Кисляков, М.А. Феноменов // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Том 7 , № 2. – с. 18-23.
- 44.Феноменов, М.А. Оптимизация стратегии WFM оператора сетей пятого поколения / Журнал «Электросвязь» М., 2024. №12-1
- 45.Феноменов, М.А. От NRI к единой базе данных о сетевых ресурсах ЕСС РФ /В.В. Никулин, М.А. Феноменов// Вестник связи. -- 2022. -- №5
- 46.Феноменов, М.А. Открытая цифровая архитектура для разработки систем управления инфокоммуникациями / А.Б. Гольдштейн, С.В. Кисляков, М.А. Феноменов // СПбГУТ, СПб. – 2024
- 47.Феноменов, М.А. Открытая цифровая архитектура. Движение к 5G операторов / А.Б. Гольдштейн, С.В. Кисляков, М.А. Феноменов // Вестник связи. – 2023 -- №7.
- 48.Феноменов, М.А. Применение комбинации методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки на контакт-центр / А.Б.Гольдштейн, А.М. Белозор, М.А. Феноменов // «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. С. В. Бачевского; сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич. СПб. : СПбГУТ, 2021. Т. 4.
- 49.Феноменов, М.А. Система Аргус — отечественная OSS в стандартах TMF/ А.Б. Гольдштейн, М.А. Феноменов // Вестник связи. -- 2008. -- №9.
- 50.Феноменов, М.А. Технический учет — фундамент эксплуатационных процессов / К. Сизюхин, М. В. Усков, М.А. Феноменов // Connect! Мир связи. – 2009. -- №5
- 51.Феноменов, М.А. Управление транспортными сетями. Единое и программно-конфигурируемое? / А.А. Атцик, С. Бакин, М.А. Феноменов // Мобильные телекоммуникации. – 2014. -- №4-5

- 52.Феноменов, М.А. Функциональная архитектура СЕМ-комплекса для внедрения в ИТ-ландшафт крупного оператора связи / В.А.Акишин, С.В.Кисляков, М.А. Феноменов // Т-Сотт - Телекоммуникации и Транспорт. -- 2016. -- №10
- 53.Феноменов, М.А. Эволюция WFM оператора связи: задачи, подходы, модели / Б.С. Гольдштейн, М.А. Феноменов // Электросвязь. -- 2024. -- №7
- 54.Феноменов, М.А. Эксплуатационное управление инфокоммуникациями / А.Б. Гольдштейн, А.А. Атцик, М.А. Феноменов // Издательство СПбГУТ. – СПб. -- 2013.
- 55.Феноменов, М.А. OSS-mobile и проблемы поддержки эксплуатации сетей мобильной связи / А.Б. Гольдштейн, И. Садовский, М.А. Феноменов // Мобильные телекоммуникации. – 2010. -- №9
- 56.Феноменов, М.А. WFM как инструмент управления Employee Experience в контакт-центре/ В.В. Никулин, Н.О. Петровский, М.А. Феноменов // Вестник связи. – 2020. -- №12 -- с. 11— 14.
- 57.Феноменов, М.А. Модель WFM на основе Открытой цифровой архитектуры / А.Б. Гольдштейн, С.В. Кисляков, М.А. Феноменов // «Вестник связи». -- 2024. -- №6
- 58.Феноменов, М.А. Workforce Management: оптимизируем расписание / С.В. Кисляков, М.А. Феноменов // Технологии и средства связи. -- 2015. -- №2. -- С. 55 — 57.
- 59.Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.:Пер. с англ. – М. Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
- 60.Чеклецов В. В. Чувство планеты: Интернет вещей и следующая технологическая революция. — М.: Российский исследовательский центр по Интернету Вещей, 2013. — 130 с.
- 61.Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции: [перевод санглийского] / Клаус Шваб, Николас Дэвис. - Москва: Эксмо, 2018. - 320 с.: ил. - (Top Business Awards).

- 62.Шнепс-Шнеппе М. А., Намиот Д. Е. Цифровая экономика: телекоммуникации — решающее звено. — М.: Горячая Линия — Телеком, 2018. — 150 с.
- 63.Яновский Г. Г., Кох Р. Эволюция и конвергенция в электросвязи. — М.: Радио и связь, 2001. — 280 с.
- 64.3GPP, TS 22.261 “Service Requirements for the 5G System, Stage 1 (Release 17). - v.16.14.0. - 2019.
- 65.5G Пятое поколение мобильной связи [Электронный ресурс] // TADVISER : [сайт]. – 2022. – URL : <https://www.tadviser.ru/a/270048> (дата обращения: 15.06.2023).
- 66.Ahn HS, Righter R, Shanthikumar JG (2005) Staffing decisions for heterogeneous workers with turnover.Math Methods Oper Res 62:499–514
- 67.Alireza Ahmadian Fard Fini, Ali Akbarnezhad, Taha H. Rashidi, Technical Papers Dynamic Programming\_ Approach\_toward Optimization of Workforce Planning Decisions, Journal of Construction Engineering and Management, Volume 144 Issue 2 - February 2018.
- 68.Anand N, Gardner HK, Morris T (2007) Knowledge-based innovation: emergence and embedding of new practice areas in management consulting firms. Acad Manag J 50:406–428
- 69.Appointment Management // [tmforum.org](https://tmforum.org) URL: <https://oda-directory.labs.tmforum.org/component-map/production/Appointment%20Management> (дата обращения: 03.03.2024).
- 70.Ateya, A.A. Study of 5G services standardization: specifications and requirements. / A.A. Ateya, A. Muthanna, M. Makolkina, A. Koucheryavy // In 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE. – Nov., 2018. – P. 1 – 6.
- 71.Battini, Daria & Berti, Nicola & Finco, Serena & Zennaro, Ilenia & Das, Ajay. (2022). Towards industry 5.0: A multi-objective job rotation model for an inclusive

- workforce. *International Journal of Production Economics*. 250. 108619. 10.1016/j.ijpe.2022.108619. t Collaboration Using a Digital Human. *Sensors*. 21. 8266. 10.3390/s21248266.
72. Berti, Nicola & Finco, Serena & Guidolin, Mattia & Battini, Daria. (2023). Towards Human Digital Twins to enhance workers' safety and production system resilience. *IFAC-PapersOnLine*. 56. 11062-11067. 10.1016/j.ifacol.2023.10.809.
73. Berti, Nicola & Finco, Serena. (2022). Digital Twin and Human Factors in Manufacturing and Logistics Systems: State of the Art and Future Research Directions. *IFAC-PapersOnLine*. 55. 1893-1898. 10.1016/j.ifacol.2022.09.675.
74. Cao H, Hu J, Jiang C, Kumar T, Li T-H, Liu Y, Lu Y, et al. (2011) OnTheMark: Integrated stochastic resource planning of human capital supply chains. *Interfaces* 41(5):414-435.
75. Carmen, R., Defraeye, M., Van Nieuwenhuysse, I. (2015). A decision support system for capacity planning in emergency departments, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 14, No. 2, 299-312.
76. Christian Koch, Sami Paavola, Henrik Buhl, "Social science and construction – an uneasy and underused relation, *Construction Management and Economics* 37:6, 2019, pages 309-316.
77. Corominas A, Lusa A, Olivella J (2012) A detailed workforce planning model including non-linear dependence of capacity on the size of the staff and cash management. *Eur J Oper Res* 216:445–458
78. Cuevas, Rodolfo & Ferrer, Juan-Carlos & Klapp, Mathias & Muñoz, Juan. (2016). A mixed integer programming approach to multi-skilled workforce scheduling. *Journal of Scheduling*. 19. 10.1007/s10951-015-0450-0.
79. De Bruecker P, Van den Bergh J, Beliën J, Demeulemeester E (2015) Workforce planning incorporating skills: state of the art. *Eur J Oper Res* 243(1):1–16

- 80.eTOM TeleManagement Forum – enhanced Telecom Operations Map (eTOM), ITU-T Recommendation M.3050, 2005
- 81.ETSI TS 122 261 v.16.14.0, 5G; Service Requirements for the 5G System. – April 2021.
- 82.Federated\_CSPs\_Marketplace. Доступ: [https://www.tmforum.org/wp-content/uploads/2020/11/Federated\\_CSPs\\_Marketplace\\_Whitepaper\\_C20.0.34.pdf](https://www.tmforum.org/wp-content/uploads/2020/11/Federated_CSPs_Marketplace_Whitepaper_C20.0.34.pdf)
- 83.Fenomenov M. Mathematical Models for Telecommunication Workforce Management / Fenomenov M.A., Goldstein L./ Telecommunications and Transport. -- 2023. – vol. 17. No1. -- p. 42-48.
- 84.Fenomenov M.A. 5G/6G Communication Networks Works Force Management /Goldstein A.B., Fenomenov M.A., Goldstein L./280 DCCN 2024 23-27 September 2024, .280-285
- 85.Fowler JW, Wirojanagud P, Gel ES (2008) Heuristics for workforce planning with worker differences. Eur J Oper Res 190(3):724–740
- 86.Fu N, Flood PC, Bosak J, Morris T, O’Regan P (2012) Exploring the performance effect of HPWS on professional service supply chain management. Supply Chain Manag Int J 18:292–307
- 87.GB1033 Functional Framework Guidebook v21.5.0 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/reference/gb1033-functional-framework-guidebook-v21-5-0/>(дата обращения: 21.12.2023)
- 88.GB1033\_Functional\_Framework\_v22. Доступ: <https://www.tmforum.org/resources/standard/gb1033a-functional-framework-addendum-v22-0/>
- 89.GB998 Open Digital Architecture (ODA) Concepts & Principles v2.1.0 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/reference/gb998-open-digital-architecture-oda-concepts-principles-v2-1-0/> (дата обращения: 16.09.2023)

- 90.GB999 ODA Production Implementation Guidelines v4.0.1 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/standard/gb999-oda-production-implementation-guidelines-v4-0/> (дата обращения: 10.10.2023)
- 91.Grinold RC, Marshall KT (1977) Manpower planning models. North-Holland, New York
- 92.Henao Botero, César & Ferrer, Juan-Carlos & Muñoz, Juan & Vera, Jorge. (2016). Multiskilling with closed chains in a service industry: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*. 179. 166-178. 10.1016/j.ijpe.2016.06.013.
- 93.Henao Botero, César & Muñoz, Juan & Ferrer, Juan-Carlos. (2015). The impact of multi-skilling on personnel scheduling in the service sector: A retail industry case. *Journal of the Operational Research Society*. 66. 1949-1959. 10.1057/jors.2015.9.
- 94.Henao Botero, César & Muñoz, Juan & Ferrer, Juan-Carlos. (2019). Multiskilled workforce management by utilizing closed chains under uncertain demand: A retail industry case. *Computers & Industrial Engineering*. 127. 74-88. 10.1016/j.cie.2018.11.061.
- 95.Huang HC, Lee LH, Song H, Eck BT (2009) SimMan—a simulation model for workforce capacity planning. *Comput Oper Res*36(8):2490–2497
- 96.İbrahim Zeki Akyurt, · Yusuf Kuvvetli, Muhammet Deveci, · Harish Garg, · Mert Yuzsever. A new mathematical model for determining optimal workforce planning of pilots in an airline company. *Complex & Intelligent Systems* (2022) 8:429–441 <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00386>.
- 97.IG1166 ODA Architecture Vision R18.0.0. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tmforum.org/resources/standard/ig1166-oda-architecture-vision-r18-0-0/> (дата обращения: 06.10.2023)
- 98.IG1167 ODA Functional Architecture. Доступ: <https://www.tmforum.org/resources/standard/ig1167-oda-functional-architecture->

- v20-0/
- 99.IG1171 ODA Component Definition R19.0.1. Доступ:  
<https://www.tmforum.org/resources/exploratory-report/ig1171-oda-component-definition-r19-0-0/>
100. IG1194 Focus on Services Not Slices v1.0.1 R19.5 Доступ:  
<https://www.tmforum.org/resources/standard/ig1194-focus-of-services-not-slices-v1-0/>
101. IG1211 ODA 5G Management Implementation Guidelines v.1.0.1  
[Электронный ресурс]. - Режим доступа:  
<https://www.tmforum.org/resources/reference/ig1211-oda-5g-management-implementation-guidelines-v1-0-0/> (дата обращения: 15.09.2023)
102. IG1228 How to use ODA Using Open APIs to Realize Use Cases v14.0.0  
[Электронный ресурс]. - Режим доступа:  
<https://www.tmforum.org/resources/reference/ig1228-how-to-use-oda-using-open-apis-to-realize-use-cases-v14-0-0/>(дата обращения: 15.12.2023)
103. Ingolfsson A, Haque MA, Umnikov A (2002) Accounting for time-varying queueing effects in workforce scheduling. *Eur J Oper Res* 139(3):585–597
104. International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops / A.A. Ateya, A. Muthanna, A. Koucheryavy, M. Khayyat // *Toward Tactile Internet, 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2019)*. – 2019. – P. 8970990.
105. ITU-R Recommendation M.2083-0. IMT Vision, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R, – Sep. 2015.
106. ITU-T Recommendation Y.3104. Architecture of the IMT-2020 network. ITU-T. – Geneva. December, 2018.

107. Jun Woo Kima, Sang Chan Parka. Flexible Workforce Management System for Call Center: A case study of public sector. *Asia Pacific Management Review* (2007) 12(6), 338-346
108. K. B. Priya Iyer, Fernandes Jeysree Felix. A Cost Effective Mathematical Model for Strategic Workforce Planning. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* ISSN: 2249-8958 (Online), Volume-9 Issue-2, December, 2019.
109. Katirae, Niloofar & Berti, Nicola & Das, Ajay & Zennaro, Ilenia & Aldrighetti, Riccardo & Dimovski, Vlado & Peljhan, Darja & Dobbs, Debra & Glock, Christoph & Pacheco, Gail & Neumann, Patrick & Ogawa, Ami & Battini, Daria. (2024). A new roadmap for an age-inclusive workforce management practice and an international policies comparison. *Open Research Europe*. 4. 85. 10.12688/openreseurope.17159.2.
110. Kharche S. /Interoperability Issues and Challenges in 6G Networks / S. Kharche, P.Dere // *Journal of Mobile Multimedia*. – 2022. № 18(5). – P. 1445 – 1470.
111. Koucheryavy, A.E. A First-Priority Set of Telepresence Services and a Model Network for Research and Education. / A.E. Koucheryavy, M.A. Makolkina, A.I. Paramonov, A.I. Vybornova, A.S.A. Muthanna, R.A. Dunaytsev, S.S. Vladimirov, O.I. Vorozheykina, A.V. Marochkina, L.S. Gorbacheva, B.O. Pankov, B.N. Anvarzhonov // *DCCN*. - 26-30 September 2022.
112. Kumari, Neeraj. (2023). Increasing Employees' Efficiency through Workforce Management. *Journal of Business Theory and Practice*. 11. p77. 10.22158/jbtp.v11n3p77.
113. Llort, N. & García, Amaia & Martínez-Costa, Carme & Mateo, Manuel. (2018). A decision support system and a mathematical model for strategic workforce planning in consultancies. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 10.1007/s10696-018-9321-2.

114. M. Sivasundari, K. Suryaprakasa Rao, R.Raju. Production, Capacity and Workforce Planning: A Mathematical Model Approach. Appl. Math. Inf. Sci. 13, No. 3, 369-382 (2019).
115. Mac-Vicar, Michael & Ferrer, Juan-Carlos & Muñoz, Juan & Henao Botero, César. (2017). Real-time recovering strategies on personnel scheduling in the retail industry. Computers & Industrial Engineering. 113. 589-601.  
10.1016/j.cie.2017.09.045.
116. Machine learning forecasting and optimized workforce scheduling (2021)  
<https://www.infor.com/resources/ml-forecasting-and-workforce-scheduling>
117. Maruyama, Tsubasa & Ueshiba, Toshio & Tada, Mitsunori & Toda, Haruki & Endo, Yui & Domae, Yukiyasu & Nakabo, Yoshihiro & Mori, Tatsuro & Suita, Kazutsugu. (2021). Digital Twin-Driven Human Robo
118. NGOSS TeleManagement Forum - New Generation Operations Systems and Software, <http://www.tmforum.org/browse.asp?catID=1911>
119. Nikhat Parveen, Saketh Ranga, Gouni Nishanth, Chaluvadi Sai Abhijith, Athmakur Harish Kumar Reddy. Work Force Management System Using Face Recognition. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. Vol.12 No.9 (2021), 56-61
120. ODA Components // [oda-directory.labs.tmforum.org](http://oda-directory.labs.tmforum.org) URL: <https://oda-directory.labs.tmforum.org/component-map> (дата обращения: 27.02.2024).
121. Open Digital Architecture. A blueprint for success in the digital markets of tomorrow. URL: <https://www.tmforum.org/resources/whitepapers/open-digital-architecture/>.
122. Party Interaction Management // [tmforum.org](http://tmforum.org) URL: <https://oda-directory.labs.tmforum.org/component-map/party-management/Party%20Problem%20Management> (дата обращения: 03.03.2024).

123. Pinedo, M.L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. (2022) Springer Publishing Company, Incorporated.
124. Praba, K. & Vijay, B. & Abuya, Joshua & Poreddy, Deepthi & Mulakala, Srinivas & Manoharan, Sendhilkumar. (2024). Human Resource Management Practices in the Age of Industrial Automation: Impact, Adoption, and Future Workforce. 10.4018/979-8-3693-5380-6.ch004.
125. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. - Telecommunication Standardization Sector of ITU. – Geneva. - 2018..
126. Recommendation ITU-T Y.3106, (04/2019), Quality of service functional requirements for the IMT-2020 network. – Geneva. – 2019.
127. Recommendation Y.3102. Framework of the IMT-2020 network. ITU-T, Geneva. – May 2018.
128. Ross Sparkman. Strategic Workforce Planning: Developing Optimized Talent Strategies for Future Growth. Kogan Page; 2nd edition, 2023.
129. Samaan, Daniel & Tursunbayeva, Aizhan. (2024). Fluid workforce management in the health sector: navigating the changing face of workforces and their management. International Journal of Public Sector Management. 37. 10.1108/IJPSM-10-2023-0311.
130. Seçkiner SU, Gökçen H, Kurt M (2007) An integer programming model for hierarchical workforce scheduling problem. Eur J Oper Res 183(2):694–699
131. Sheldon M. Ross. Introduction to Probability Models. Eleventh Edition. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2014.
132. Stephan HA, Gschwind T, Minner S (2010) Manufacturing capacity planning and the value of multistage stochastic programming under Markovian demand. Flex Serv Manuf J 22:143–162

133. Steve Hatfield Unlocking workforce productivity with the AI-enabled opportunity marketplace <https://www2.deloitte.com/us/en/blog/human-capital-blog/2020/ai-workforce-management.html>
134. Taleb T. Extremely-Interactive and Low Latency Services in 5G and Beyond Mobile Systems / Taleb T., Nadir Z., Flinck H., Song J.S. // IEEE Communications Standard Magazine. - v.5. - issue 2. - June 2021. - pp.114-119.
135. Tanya Moore and Eric Bokelberg How IBM Incorporates Artificial Intelligence into Strategic Workforce Planning <https://www.shrm.org/executive/resources/people-strategy-journal/Fall2019/Pages/moore-bokelberg-feature.aspx>
136. Technical Specification ETSI TS 123 01 v16.6.0 Release 16. 5G. System architecture for the 5G System (5GS). ETSI, France. – October 2020.
137. The TOGAF Standard, Version 9.2. Доступ: <https://www.opengroup.org/togaf-standard-version-92-licensed-downloads>
138. TMFC014 Location Management v1.0.0 // [tmforum.org](https://www.tmforum.org) URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc014-location-management-v1-0-0/> (дата обращения: 03.03.2024).
139. TMFC028 Party Management v1.1.0 // [tmforum.org](https://www.tmforum.org) URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc028-party-management-v1-1-0/> (дата обращения: 03.03.2024).
140. Vajda S. Mathematics of Manpower Planning. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1978
141. Valls, V., Pérez, Á., Quintanilla, S. (2009). Skilled workforce scheduling in service centres, European Journal of Operational Research, Vol. 193, No. 3, 791-804,
142. Willis G, Cave S, Kunc M (2018) Strategic workforce planning in healthcare: a multi-methodology approach. Eur J Oper Res 267(1):250–263
143. Workforce asset management book of knowledge / Lisa Disselkamp, editor. John Wiley & Sons, Inc. 2013.

144. Yastrebova A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements / Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A. // 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). - 2018. - P. 1–8.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AN - Autonomous Networks,

API - прикладные программные интерфейсы

BSS - Business Support System

CaaS - Connectivity-as-a-Service

CD - Continuous Delivery,

CFS - сервис, который непосредственно использует конечный пользователь

CI - Continuous Integration,

CID – информационная модель

COVID 19 - coronavirus disease 2019

CRM– Customer Relationship Management

DSS - Decision Support System

DTS - Data Transformation Services

ERP - Enterprise Resource Planning

eTOM - enhanced Telecom Operations Map

ETSI - European Telecommunications Standards Institute

Eurescom - частная организация по управлению европейскими проектами исследований и разработок в области телекоммуникаций

FA - Functional Architecture

FAB

FF - Functional Framework, структуры программных приложений

Framework - концепция телекоммуникационной отраслевой организации ТМ Forum, описывающая подход к разработке, внедрению и эксплуатации

прикладного программного обеспечения для предприятий электросвязи

HCS - Hybrid Connectivity Service,

HelpDesk – техническая поддержка

HR - Human Resources

IBN - Intend Based Networks

IIoT - industrial internet of things

IoT - Internet of Things

IT - Information Technology

ITU-T - International Telecommunication Union – Telecommunication Sector

IVR - Interactive Voice Response

KPI - ключевые показатели эффективности, Key Performance Indicators

LDHF

LP – Linear programming

LTE - Long-Term Evolution

NaaS - Network as a Service

NGN - Next-Generation Networks

NGOSS - New Generation Operations Systems & Software

ODA - Open Digital Architecture

OMG - Object-Management Group

OSS - Operation Support System

OTT-сервис - over the top, интернет-доступ к собственным услугам без прямого контакта с оператором связи и его участия в распределении информации

PM - Party Management

PROSA

RAN - Radio access network

RF - Resource Functions

RM&O - Resource Management & Operations

SDN/NFV - Software-Defined Networking \ Network Functions Virtualization

SID - Shared Information and Data Model

SLA - Service Level Agreement

SM&O - управление, выполнение, обеспечение качества и выставление счетов

SMS - short message service

TAM - Telecom Application Map

TISPAN - Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking

TMForum, TMF - TeleManagement Forum

TMN - Telecommunications Management Network

TNA - Технологически нейтральная архитектура

TOGAF - The Open Group Architecture Framework

WFM - WorkForce Management (управление персоналом)

WiFi - технология беспроводной связи

АТС – автоматическая телефонная станция

БП – бизнес-процессы

БФ - бизнес-функции

ВВХ - вероятностно-временные характеристики

ЕСЭ РФ - Единая сеть электросвязи Российской Федерации

ИИ (AI) - искусственный интеллект (artificial intelligence)

КзОТ – кодекс законов о труде Российской Федерации

МРК – межрегиональная компания

НТЦ Протей – научно-технический центр Протей

О2О – обсуживание стороннего оператора,

ОАО – открытое акционерное общество

ПАО – публичное акционерное общество

ПО – программное обеспечение

СПбГУТ – Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

СПС - сетей подвижной связи

ТУ - технический учет

ТфОП – телефонная сеть общего пользования

ФОТ – фонд оплаты труда

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ



sigurd-it.ru  
sales@sigurd-it.ru  
+7(812)449-47-32

194044, г. Санкт-Петербург, ул. Гельсингфорсская, д. 4,  
к. 1, Литера В, пом. 16-Н, оф. 28, БЦ «Красная Заря»

ООО «СИГУРД-АйТи»  
ИНН 7802695166, КПП 780201001

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор ООО «СИГУРД-АЙТИ»  
Р.В.Потишный.  
«03» 12 2024г.

## АКТ

о внедрении научных результатов

полученных в диссертационной работе Феноменова Михаила Александровича

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО  
ОПЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К СЕТЯМ 5G/6G

Комиссия в составе:

- Потышный Роман Васильевич, Генеральный директор
- Сергеева Мария Юрьевна, Технический директор
- Михасёнок Ирина Александровна, Руководитель подразделения технической поддержки

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Феноменовым Михаилом Александровичем в диссертации «Модели и методы управления персоналом телекоммуникационного оператора в условиях перехода к сетям 5G/6G», а именно:

- Инженерный метод оптимизации, детализирующий оптимальную стратегию WFM с учетом норм трудового законодательства, выходных дней и отпусков, позволяют создавать практические расписания, графики смен, недельные и месячные планы работ для сотрудников Call-центров.

Внедрение предложенного метода позволило сократить количество человеко-часов, затрачиваемое работниками-составителями расписаний на составление расписания для операторов колл-центров, что дало уменьшение затрат на фонд оплаты труда.

Генеральный директор:

Технический директор:

Руководитель подразделения технической поддержки:

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «НТЦ СевенТест»

 Б.Я. Розенцвайг

АКТ

о внедрении научных результатов  
полученных в диссертации Феноменова М.А.



Комиссия в составе:

- Ехриеля Ильи Михайловича, к.т.н., технического директора ООО «НТЦ СевенТест»
- Соколова Андрея Николаевича, к.т.н., старшего научного сотрудника отдела разработки ПО тестирования качества связи ООО «НТЦ СевенТест»

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Феноменовым Михаилом Александровичем в диссертации «Модели и методы управления персоналом телекоммуникационного оператора в условиях перехода к сетям 5G/6G», внедрены в решения серии «Профит» разработки ООО «НТЦ СевенТест»

При разработке были использованы следующие новые научные результаты из диссертации:

Оптимизация стратегий WFM, позволяющая вычислить оптимальную стратегию на базе граничного времени выполнения работ, заданной вероятности нарушения этих сроков, интенсивности поступления запросов, интенсивности обслуживания и с учетом стоимости единицы рабочего времени для сотрудников разной квалификации.

Технический директор, к.т.н.  И.М. Ехриель

Старший научный сотрудник, к.т.н.  А.Н. Соколов

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор ООО "ИНФОРМ-связь"  
Кулаженков А.А.

" \_\_\_\_\_ 2024 г.

АКТ

внедрения в производственный процесс научных результатов, полученных  
Феноменовым М.А. в его диссертационной работе  
"Модели и методы управления персоналом телекоммуникационного оператора в условиях  
перехода к сетям 5G/6G " представленной на соискание  
ученой степени доктора технических наук по специальности  
2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель: Яковкин АГ Заместитель Генерального директора по ИТ

Члены комиссии : Цымбалюк А.Н Заместитель Генерального директора-  
Технический директор

Богомолова Л.В. Главный бухгалтер

Акт подтверждает внедрение результатов, полученных в диссертационной работе  
Феноменова М.А., в производственную деятельность ООО "ИНФОРМ-связь":

Аналитическая трехфазная модель управлению персоналом  
телекоммуникационного оператора (WFM) мультисерисных сетей,  
включающая фазы планирования работ, выполнения работ, анализа и  
сохранение в OSS/BSS результатов работ и позволяющая рассчитать  
вероятностно-временные характеристики выполнения работ для разных  
эксплуатационных, пуско-наладочных и профилактических задач в сети.

Внедрение результатов диссертационной работы позволит оптимизировать  
производственные затраты на эксплуатационную поддержку сетевой и ИТ  
инфраструктуры.

Подписи

Яковкин АГ

Цымбалюк А.Н

Богомолова Л.В.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРОГРАММА НЕЙРОННОЙ СЕТИ.

### Трансформация датасета в тренировочный

```
data_dir = 'dataset'
image_datasets = {x: datasets.ImageFolder(os.path.join(data_dir, x),
                                             data_transforms[x])
                  for x in ['train', 'val', 'lev']}
dataloaders = {x: torch.utils.data.DataLoader(image_datasets[x], batch_size=4,
                                             shuffle=True, num_workers=4)
              for x in ['train', 'val', 'lev']}
dataset_sizes = {x: len(image_datasets[x]) for x in ['train', 'val', 'lev']}
class_names = image_datasets['train'].classes

#device = torch.device("cuda:0" if torch.cuda.is_available() else "cpu")
device = torch.device("cpu")
PATH = './name.pth'
```

### Визуализация тренировочной модели

```
def trainList(class_names):
    #Visualize Training images
    def imshow(inp, title=None):
        """Imshow for Tensor."""
        inp = inp.numpy().transpose((1, 2, 0))
        mean = np.array([0.485, 0.456, 0.406])
        std = np.array([0.229, 0.224, 0.225])
        inp = std * inp + mean
        inp = np.clip(inp, 0, 1)
        plt.imshow(inp)
        if title is not None:
            plt.title(title)
        plt.pause(0.001)  # pause a bit so that plots are updated

    inputs, classes = next(iter(dataloaders['train']))  # Get a batch of training c
    out = torchvision.utils.make_grid(inputs)  # Make a grid from batch
    imshow(out, title=[class_names[x] for x in classes])
```

## Обучение CNN

```
#Training The Model
#1 Scheduling the Learning Rate
#2 Saving the best model
def trainModel(model, optimizer, criterion, scheduler, num_epochs=25):
    since = time.time()
    best_model_wts = copy.deepcopy(model.state_dict())
    best_acc = 0.0

    for epochs in range(num_epochs):
        #each epoch for train , val and test set
        print('EPOCH {}/{}'.format(epochs,num_epochs-1))

        for phase in ['train', 'val']:
            if phase == 'train':
                scheduler.step()
                model.train()
                #Set in Training mode
            else :
                model.eval()
                #set in evaluation mode

            running_loss = 0.0
            running_corrects = 0

            for inputs, labels in dataloaders[phase]:
                optimizer.zero_grad()
                inputs = inputs.to(device)
                labels = labels.to(device)

                with torch.set_grad_enabled(phase == 'train'):
                    # forward and track history if only in train
                    outputs = model(inputs)
                    _, preds = torch.max(outputs, 1)
                    loss = criterion(outputs, labels)

                    if phase == 'train':
                        # backward + optimize only if in training phase
                        loss.backward()
                        optimizer.step()
```

```
optimizer.step()
# statistics
    running_loss += loss.item() * inputs.size(0)
    running_corrects += torch.sum(preds == labels.data)

    epoch_loss = running_loss / dataset_sizes[phase]
    epoch_acc = running_corrects.double() / dataset_sizes[phase]

    print('{} Loss: {:.4f} Acc: {:.4f}'.format(phase, epoch_loss, epoch_acc))

    if phase == 'val' and epoch_acc > best_acc:
        # deep copy the model
        best_acc = epoch_acc
        best_model_wts = copy.deepcopy(model.state_dict())

    print()
    time_elapsed = time.time() - since
    print('Training complete in {:.0f}m {:.0f}s'.format(time_elapsed // 60, time_elapsed % 60))
    print('Best val Acc: {:.4f}'.format(best_acc))

    model.load_state_dict(best_model_wts)
    # load best model weights
    return model
```

## Функция оптимизации CNN

```
#Train and Evaluate
def startTrain(model, optimizer_conv, criterion, exp_lr_scheduler):
    global PATH
    model = trainModel(model, optimizer_conv, criterion, exp_lr_scheduler, num_epochs=1)
    showPred(model, 'val')
    torch.save(model.state_dict(), PATH)
```

## Функция предсказания ответа

```
def showPred(model, way, num_images=16):
    was_training = model.training
    model.eval()
    images_so_far = 0
    fig = plt.figure()

    with torch.no_grad():
        for i, (inputs, labels) in enumerate(dataloaders[way]):
            inputs = inputs.to(device)
            labels = labels.to(device)

            outputs = model(inputs)
            _, preds = torch.max(outputs, 1)

            for j in range(inputs.size()[0]):
                images_so_far += 1
                ax = plt.subplot(num_images//2, 4, images_so_far)
                ax.axis('off')
                ax.set_title('predicted: {}'.format(class_names[preds[j]]))
                imshow(inputs.cpu().data[j])

            if images_so_far == num_images:
                model.train(mode=was_training)
                return
    model.train(mode=was_training)
```

;

## Вывод предсказания на экран

```
def pred(model):
    global PATH
    model.load_state_dict(torch.load(PATH))
    showPred(model, 'lev')
```

## Предсказание модели

```
plt.ion()
train_mask = 'C:/Users/lq090.DESKTOP-8LQHS9S/dataset/train/mask'
print('total training mask images:', len(os.listdir(train_mask)))

train_wmask = 'C:/Users/lq090.DESKTOP-8LQHS9S/dataset/train/without_mask'
print('total training without mask images:', len(os.listdir(train_wmask)))

val_mask = 'C:/Users/lq090.DESKTOP-8LQHS9S/dataset/val/mask'
print('total validation mask images:', len(os.listdir(val_mask)))

val_wmask = 'C:/Users/lq090.DESKTOP-8LQHS9S/dataset/val/without_mask'
print('total validation without mask images:', len(os.listdir(val_wmask)))
```