

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Транспорт»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Е.С. Воеводин

« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра услуг
оптовых продавцов
23.04.03.01 Автомобильный сервис
23.04.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Научный руководитель

канд.техн.наук. доцент. Князьков А.Н.

Выпускник

Митрофанов А.С.

Рецензент

магистр техники и технологии Галимов Р.Р.

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра услуг оптовых продавцов» содержит 69 страниц текстового документа, 3 приложения, 34 использованных источника.

ОПТОВЫЕ ПРОДАВЦЫ, ДОСТАВКА ТОВАРА, SAA, MIP, МОДУЛИ ОБРАБОТКИ, ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ФОРМУЛИРОВКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ.

Объект исследования – Оптовый рынок запасных частей.

Цель исследования:

- Изучение рынка оптовых продаж
- Повышение уровня обслуживания клиентов

Упор в работе был сделан на доставку товара и уровень обслуживания клиентов. В результате исследования разработана система расчета для максимизации уровня обслуживания клиентов. Разработано два подхода: SAA и MIP, основанных на характеристиках задачи. Обладая некоторым объемом данных о потребностях клиентов, а также ограниченным бюджетом, метод позволяет рассчитать уровень риска, уровень покрытия транспорта при доставке и уровень обслуживания.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. Анализ состояния вопроса на тему «Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра услуг оптовых продавцов» . .	8
1.1 Анализ продаж запасных частей оптом.	8
1.2 Статистика запросов клиентов и продаж запасных частей.	8
1.3 Способы конкуренции оптовых продавцов.....	9
1.4 Пример оптовых продавцов г. Красноярск	11
1.5 Статистика продаж автомобилей в России.....	15
1.6 Статистика продаж автозапчастей по брендам.....	15
1.7 Доставка деталей клиенту	29
Выводы по главе.....	30
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
Введение.....	31
2.1. IRP с неопределенными требованиями клиентов	33
2.2. IRP с учетом уровня обслуживания	34
2.3. Модули обработки	34
2.4. Распределенно устойчивые подходы	35
2.5. Описание проблемы	35
2.6. Распределенная устойчивая формулировка	36
2.7 Решение подходов	37
2.8. Эквивалентная формулировка	38
2.9. SAA	38
2.10. Основанный на MIP иерархический подход	40
2.10.1. Набор неопределенности.....	40
2.10.2. Тождество Бонферрони	41
2.10.4. Аппроксимация случайного ограничения для стоимости системы.....	42
2.10.5. Примерная формулировка MIP.....	42
Выводы по главе.....	46
ГЛАВА 3 ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	47
3.1 Вычислительные эксперименты	47
3.2. Тест вне образца	47

3.3. Наглядный пример	48
3.4. Численные эксперименты на случайно сгенерированных экземплярах ..	50
3.5. Анализ чувствительности.....	53
Выводы по главе.....	57
ГЛАВА 4 ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	59
4.1 Создание сети оптовых складов с доставкой.	59
4.2 Подготовка и переподготовка специалистов	61
Выводы по главе.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	65
Приложение А. Аппроксимация случайных ограничений общей стоимости	69
Приложение В. Аппроксимация распределенно устойчивых случайных ограничений	72
Приложение С. Предварительный анализ	73

ВВЕДЕНИЕ

В данный момент оптовый рынок в России развит достаточно сильно. В каждом городе существует огромное количество оптовых фирм, которые занимаются поставкой товаров. На данный момент в городе Красноярск насчитывается более шестисот оптовых компаний.

Независимо от того, в какой сфере услуг осуществляется закупка товара оптом, условия закупки, а также ценообразования для продавцов примерно одинаковы. Исходя из этого, предприниматели вынуждены искать новые способы привлечения клиентов. Так как тема исследования звучит как: «Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра услуг оптовых продавцов», то решено было провести исследование услуги доставки товара.

ГЛАВА 1. Анализ состояния вопроса на тему «Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра услуг оптовых продавцов».

1.1 Анализ продаж запасных частей оптом.

На сегодняшний день на рынке существует множество поставщиков запасных частей на все классы автомобилей, которые составляют друг другу конкуренцию.

Учитывая то, что поставщики оптовых партий у всех продавцов практически одни и те же, конкурировать становится в разы сложнее и единственный выход из данной ситуации, конкурировать не только на уровне цены, а на уровне дополнительных услуг и поощрений.

Так же следует учитывать то, что важно ориентироваться не на абстрактного покупателя, а на конкретного клиента, про которого продавец располагает информацией — род занятий, территориальное расположение, класс авто, ориентир при выборе (сроки, цена), требования к сервису. Нужно четко знать, кто обращается и почему.

Покупателей условно можно разделить на две группы:

1. Автосервисы, которые поставляют запчасти своим клиентам. Для автосервисов значение играет ассортимент и скорость выполнения заказов. Это наиболее перспективная категория клиентов, так как запчасти автосервисам нужны регулярно и в больших количествах — у них всегда есть на них спрос. Автосервисы являются основными потребителями дорогих запчастей и запчастей к элитным автомобилям. Но при этом цена может быть не самой низкой.

По статистике, чем дороже автомобиль, тем чаще запчасти к нему покупают фирменные СТО, а не сами автовладельцы.

2. Розничные покупатели — автовладельцы, их друзья и родственники, приобретающие товар для собственных потребностей. Плюсом этой группы потребителей в том, что она готова платить процентов на 10-20 больше, если магазин будет находиться близко к дому/офису, если ей понравится обслуживание и подойдет график работы. Минус — в том, что потребность в запчастях не постоянна. И для того, чтобы иметь стабильный доход нужна на порядок больше клиентская база.

1.2 Статистика запросов клиентов и продаж запасных частей.

Чтобы максимально удовлетворять желания покупателей, необходимо вести статистику востребованности товаров и регулярно анализировать данные о продажах в интернете. Это позволит детально изучить спрос и понять, какая запасная часть актуальна в определенный момент времени.

1. Статистика продаж. Ведение статистики реализованных товаров позволит усовершенствовать складской учет и не накапливать на складах запчасти, которые не пользуются спросом у покупателей.

2. Статистика запросов. Запросы покупателей не менее важны, чем их покупки. В первую очередь изучение запросов позволяет понять желания клиентов. Во вторую — прояснить, почему некоторые товары продаются плохо.

Для ведения собственно статистики необходимо фиксировать в базе все, что было продано, а также все, чем интересовались клиенты. Эти сведения продемонстрируют реальный спрос на запасные части. Необходимо провести опрос среди постоянных покупателей, попросив указать, чего им не хватает в вашем магазине. На основе опроса внести корректировки в предлагаемый спектр услуг и обслуживания для более высокого процента удовлетворенности клиента.

Если статистики на начальном этапе нет, нужно изучать спрос с помощью Интернета. Благодаря интернет сервисам (на пример Wordstat Yandex) можно узнать поисковую статистику Рунета или отдельно взятого региона. Конечно, точных цифр он не покажет, но как минимум можно понять, автозапчасти к каким автомобилям ищут чаще в вашем городе или области.

В оптовой торговле значение имеет расторопность продавца. Как правило, автосервисы сами знакомы с техническими особенностями нужных им деталей, а потому ценят в первую очередь быстрое обслуживание. Если наладить оперативный сбор заказов и быструю доставку — это позволит повысить оптовые продажи. А для этого нужно, чтобы наиболее востребованные запчасти всегда были в наличии на складе. Отладка процесса продажи — один из основных способов конкурировать в современных условиях.

1.3 Способы конкуренции оптовых продавцов.

Так как оптовые продавцы не могут конкурировать ценой на детали, то хорошим способом удержать или привлечь клиентов будет конкуренция через дополнительные сервисные предложения и/или акции на товары.

Рассмотрим несколько примеров:

1. Дополнительные товары. Продавать нужно не только запчасти, но и расходные материалы — масла, свечи, автохимию и т.д. Если сформировать хорошие отношения с клиентами, то заказывать недорогую мелочь они тоже будут у продавца.

2. Продажа нескольких товаров вместо одного. Продавать товары, на которых вы хорошо зарабатываете, можно вместе с другими товарами. В этом случае задача привлечь покупателя в магазин. А задача продавца, не только продать ему товар, за которым он пришел, но заодно, и сопутствующий ему товар (пакетное предложение).

Рассмотрим на примере:

Для замены масла в автомобиле требуется не только само масло, но и фильтры. На пример, можно предложить скидку на фильтры при покупке определенного объема масла.

С большой долей вероятности клиент купит в магазине все и сразу, чему будет тратить время на поиск более дешевых вариантов.

3. Расширенный спектр услуг и «поощрений» клиента. Для более активного привлечения покупателей, помимо акций на определенные товары, нужно вводить различные услуги. Примером может послужить доставка запасных частей по городу при покупке их на определенную сумму, бесплатная замена масла или колодок в сервисе, если они были приобретены у нас, бесплатный шиномонтаж при покупке комплекта резины и т.д.

4. Интернет. В Сети можно рекламировать интернет-магазин или сервис по подбору запчастей и их резервации в точке продаж. Проблема многих существующих сервисов – их «технический подход» к клиенту. Посетителю нужно знать различные технические аспекты своего автомобиля, что затрудняет выбор и совершение заказа.

Сделать в интернет-магазине удобный для пользователей функционал (с возможностью выбора товара по параметрам), предложить несколько вариантов оплаты и доставки, максимально упростить оформление заказа (без регистрации и заполнения ненужных форм), добавить отзывы клиентов и рейтинг товаров.

Одним из основных критериев является правильное продвижение ресурса в сети. Для максимально быстрого результата можно использовать рекламные сервисы.

5. Реклама. Для автозапчастей двигателем продаж могут стать «холодные» обзвоны автосервисов. Еще один вариант — реклама в специализированных автомобильных изданиях или местных журналах и газетах

6. Скидки. При заказе товара на N-ую сумму или в определенном количестве (оптом) возможно предоставление скидок.

1.4 Пример оптовых продавцов г. Красноярск

На данный момент в городе Красноярск существует 236 предприятий, которые занимаются оптовой и оптово – розничной продажей запасных частей для автомобилей.

У каждого продавца разработана своя программа лояльности для клиентов, а также сервис для технического обслуживания.

Рассмотрим на примере несколько крупных предприятий:

1. Сакура Моторс



Адрес: ул. Вавилова, д. 1г

Телефон/факс: 8(391)2636000

Отдел заказов: zakaz@sakura-motors.ru

Компания основана в 1995 году. Занимается поставкой запчастей для японских автомобилей.

«Мы были одни из первых, кто начал поставлять в Красноярск из Японии подержанные автомобили и контрактные запасные части.

На сегодняшний день Сакура Моторс является одним из признанных лидеров на красноярском рынке не только контрактных запчастей, но и новых запчастей и сервисного обслуживания автомобилей.

По статистике 2011 года ежедневно магазины и сервисный центр правобережного филиала обслуживают от 400 до 500 человек.»

У компании разработана своя программа лояльности для клиентов, которая включает в себя различные скидки и предложения. Актуальные скидки и предложения можно отследить на сайте фирмы: <https://sakura-motors.ru/news/>. Так же предусмотрен сервис для обслуживания автомобилей клиентов, который включает в себя: диагностику авто, ремонт автоэлектрики, кузовной ремонт, техническое обслуживание, а также шиномонтаж.

Для постоянных клиентов разработана дисконтная накопительная система скидок по карте.

Размер скидок представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Дисконтная система скидок

Накопленн ая сумма (руб.)	Максимальн ая скидка	Размер скидки по группам товаров и услуг			
		Контрактн ые запчасти. <i>Кроме двигателей и КПП</i>	Услуги автосервис а. <i>Только работы сервиса Сакура Моторс</i>	Новые запчасти. <i>Кроме моторн ых масел</i>	Контрактн ые КПП
3 000	3%		3		3
1000	4%		4		4
2000	5%		5		5
4500	6%		6		
70 000	7%		7		
95 000	8%		8		
120 000	9%		9		
150 000	10%		10		

Товары и услуги без скидок:

Скидки по дисконтным картам не распространяются на следующие группы товаров и услуг:

1. Контрактные ДВС
2. Моторные масла
3. Запчасти, приобретаемые через отдел заказов
4. Запчасти, приобретаемые или заказываемые сервисом «Сакура Моторс» в сторонних организациях
5. Работы, выполняемые по заказу сервиса «Сакура Моторс» в сторонних организациях

2. АзияИнвест

Адрес: 3-я Краснодарская, д. 14а, стр. 3

Телефон: 8(391)2699080

Электронный адрес: info@asiacars.ru



«АзияИнвест» – одна из крупнейших компаний в Сибири, занимается оптово-розничной продажей контрактных автозапчастей на Японские и Европейские автомобили. Лидирующее положение на рынке нам позволяет занимать наличие собственной разборочной базы автомобилей в Японии, проверенные качественные контрактные запчасти, квалифицированный персонал с большим опытом работы, развитая сеть логистики, позволяющая осуществлять мелкооптовые поставки запчастей автосервисам и автомагазинам с персональными скидками и индивидуальным подходом к каждому клиенту. На нашем складе в Красноярске всегда имеются контрактные запчасти для автомобилей таких производителей, как: TOYOTA, HONDA, NISSAN, MAZDA, MITSUBISHI, SUBARU, DAIHATSU, ISUZU, SUZUKI, BMW.»

Фирма занимается поставкой автозапчастей оптом для европейских и японских автомобилей. Запчасти для японских автомобилей доставляются путем разбора автомобилей непосредственно в Японии, после чего доставляются в России и отправляются транспортными компаниями клиентам.

У компании существует пункт разбора авто непосредственно в Красноярске, где в данный момент насчитывается 4587 автомобилей европейского и японского производства. Также оборудован склад деталей.

В компании регулярно проводятся акции по снижению цен. Для удобства клиентов функционирует автосервис.

3. BMW Club

Адрес: ул. Партизана Железняка, д. 32

Телефон: 8(391)2828511



«Компания BMW клуб КРАСНОЯРСК успешно работает на рынке автозапчастей с 2010 г. и является крупнейшим поставщиком автозапчастей

для марки BMW в Красноярском крае. Мы имеем огромный склад в г. Красноярске который включает в себя порядка 5 тысяч наименований запчастей, а также порядка 100 тысяч позиций (в том числе и любых эксклюзивных для этой марки автомобиля) доступны для заказа, который мы оформим и доставим для вас в кратчайшие сроки. Ассортиментный перечень запчастей включает в себя, как оригинальные запчасти, так и запчасти сторонних заводов-изготовителей со всего мира, что позволяет подобрать нужную деталь практически для любого бюджета.

У нас налажена доставка в регионы, поэтому вам не придется ехать за нужным товаром в Красноярск.»

Помимо оптовых продаж запчастей, фирма занимается продажей различных аксессуаров и расходных жидкостей для авто.

«Помимо автозапчастей и расходных материалов наша компания предлагает СВОИМ КЛИЕНТАМ огромный выбор масел для двигателя, коробки передач, редуктора, раздаточной коробки, системы гидроусилителя руля, гидроподвески, а также различные охлаждающие жидкости оригинального производства и всемирно известных компаний, рекомендованных автопроизводителями к применению в своих автомобилях.

Также компания предлагает автомобилистам различные аксессуары, а именно — коврики в салон авто, коврики в багажник, щетки стеклоочистителя, различные лампочки.»

Разработана система лояльности для постоянных клиентов:

«Вы будите получать дополнительные бонусы если станете нашим постоянным клиентом. Постоянные клиенты нашего клуба получают доступ к системе скидок и различных бонусов. Также дисконты предусмотрены всем участникам нашего партнера - дисконтного клуба 24AUTO.RU

В нашем BMW Клубе постоянно проходят акции на запчасти для BMW. Мы стараемся сделать так, чтобы наши клиенты были всегда довольны ценами, наличием и скоростью доставки.»

Помимо запчастей для автомобилей марки BMW, компания занимается доставкой запчастей для автомобилей марки JAGUAR, AUDI, PORSCHE, VOLKSWAGEN, PEUGEOT, SKODA, RENAULT, CITROEN, LAND ROVER, MERCEDES – BENZ, OPEL, VOLVO, DAEWOO, FORD, CHEVROLET.

Исходя из проделанного исследования, можно сделать вывод, что продавцы предлагают практически одинаковые товары, которые доставляются из одних и тех же источников. Основная конкуренция приходится на рынок дополнительных услуг и предложений для клиентов.

Из этого мы видим, что управлять продажами можно путем привлечения большего числа клиентов за счет разработки удобной и выгодной обоим сторонам программы лояльности.

1.5 Статистика продаж автомобилей в России

Количество зарегистрированных автомобилей, согласно статистике, стабильно увеличивается. Количество зарегистрированных автомобилей в России представлено на рисунке 1



Рисунок 1 – Количество зарегистрированных автомобилей

Увеличение объёма автомобилей ведет к увеличению спроса запасных частей. Рост рынка запасных частей способствует появлению новых брендов, большего числа аналогов. В итоге перед владельцем автомобиля предстоит сложный выбор производителя запасной части, а также предстоит выбрать в каком месте приобрести деталь. У разных продавцов – разные предложения.

1.6 Статистика продаж автозапчастей по брендам

На данный момент представлено огромное количество различных брендов, которые изготавливают запасные части для автомобилей. Существуют как высококачественные заменители оригинальных запчастей, так и реплики ужасного качества. Исходя из статистики запросов, а также статистики заказов запчастей, можно составить наглядную картину о том, каких брендов запасные части пользуются наибольшей популярностью у потребителей.

Запчасти были разбиты по категориям для удобства:

- Амортизаторы
- Тормозные колодки
- Подшипники
- Детали подвески
- Фильтры
- Ремни и ролики
- Автолампы
- Радиаторы
- Свечи зажигания
- Тормозные диски
- Сцепление

На рисунке 2 представлена диаграмма продаж амортизаторов.

Амортизаторы

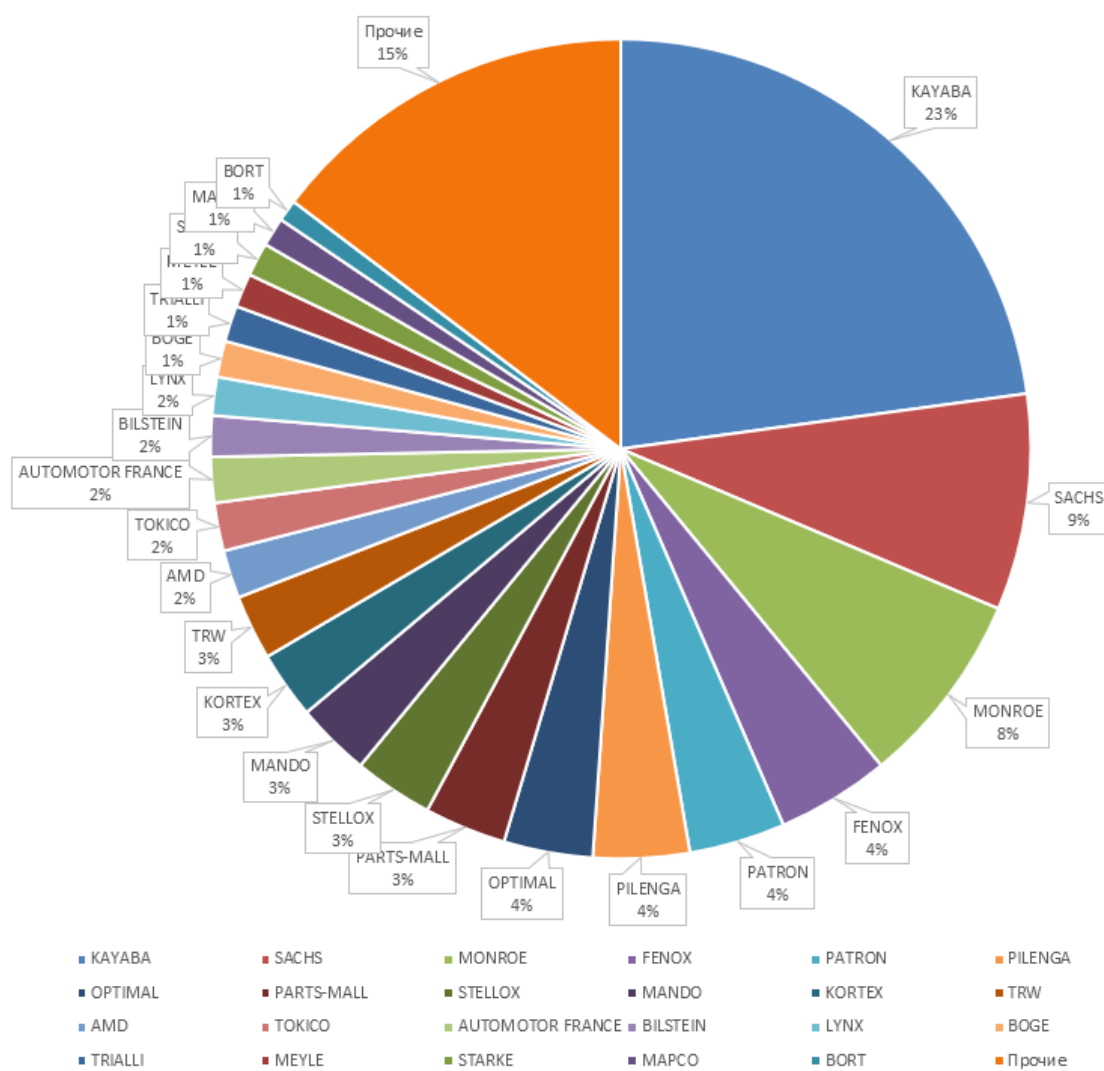


Рисунок 2 – Диаграмма продаж амортизаторов

Исходя из информации, которая представлена на диаграмме, можно сделать выводы, что наибольшей популярностью пользуется японская продукция КАУАВА. Далее 15% занимают неизвестные мелкие производители, из чего можно сделать вывод что потребитель не всегда хочет платить за продукты высокого качества, а предпочитает дешевизну в ущерб качеству.

На рисунке 3 представлена диаграмма продажи тормозных колодок.

Тормозные колодки

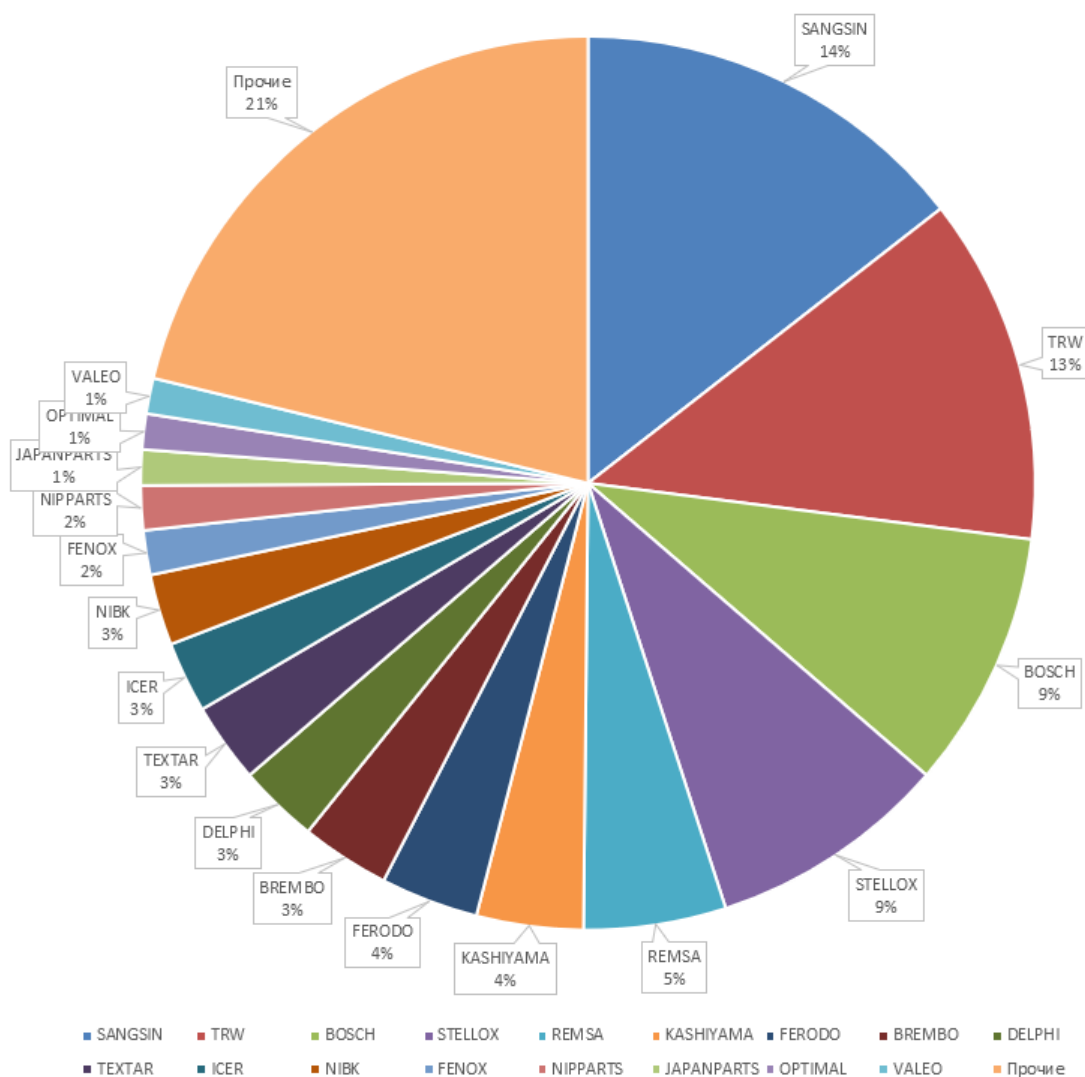


Рисунок 3 – Диаграмма продаж тормозных колодок

На данном рисунке мы видим, что потребители предпочитают продукцию неизвестных производителей, а также продукцию SANGSIN и TRW.

На рисунке 4 представлена диаграмма продаж подшипников.

Подшипники

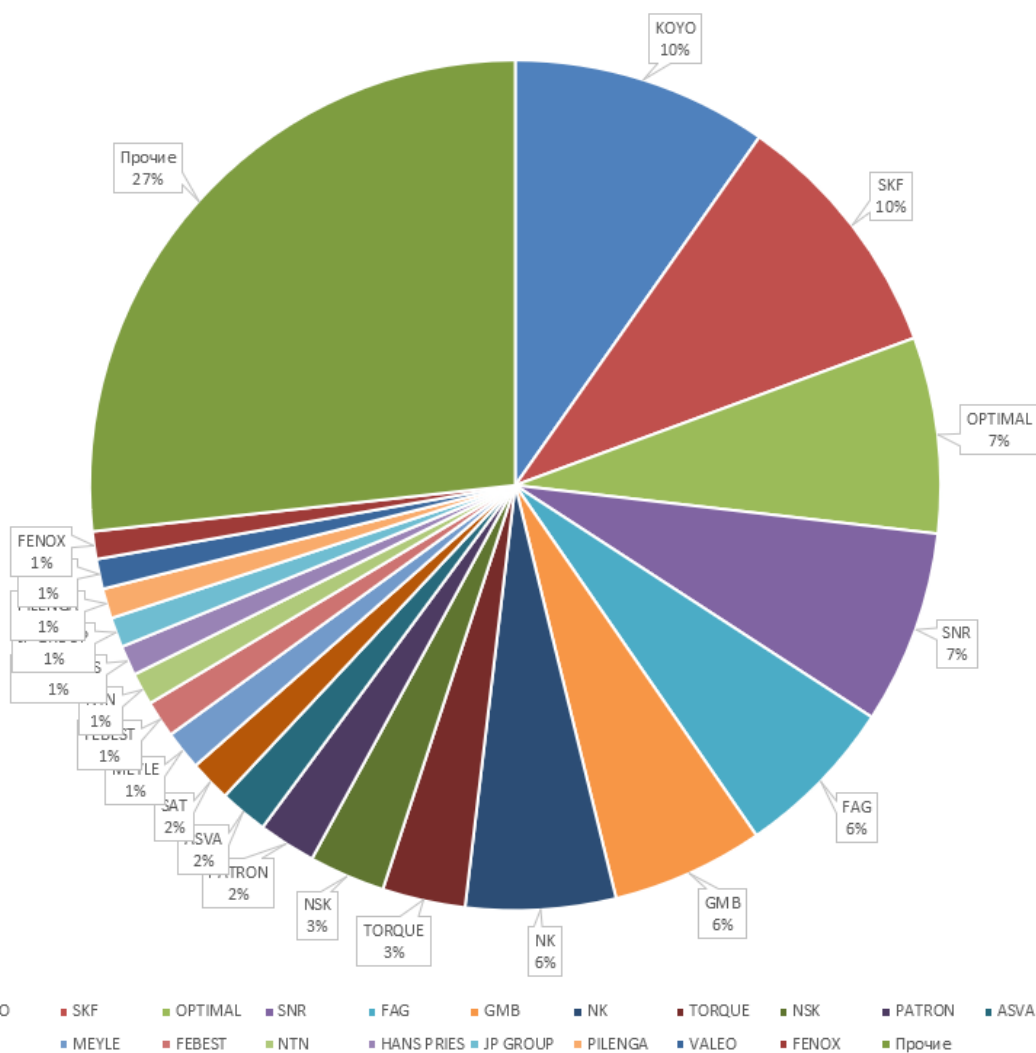


Рисунок 4 – Диаграмма продаж подшипников

На данном рисунке большую часть диаграммы в процентном соотношении занимают неизвестные производители – 21%.

На рисунке 5 представлена диаграмма продаж деталей подвески. Что подразумевает под собой сайлентблоки, рычаги и т.д.

Детали подвески

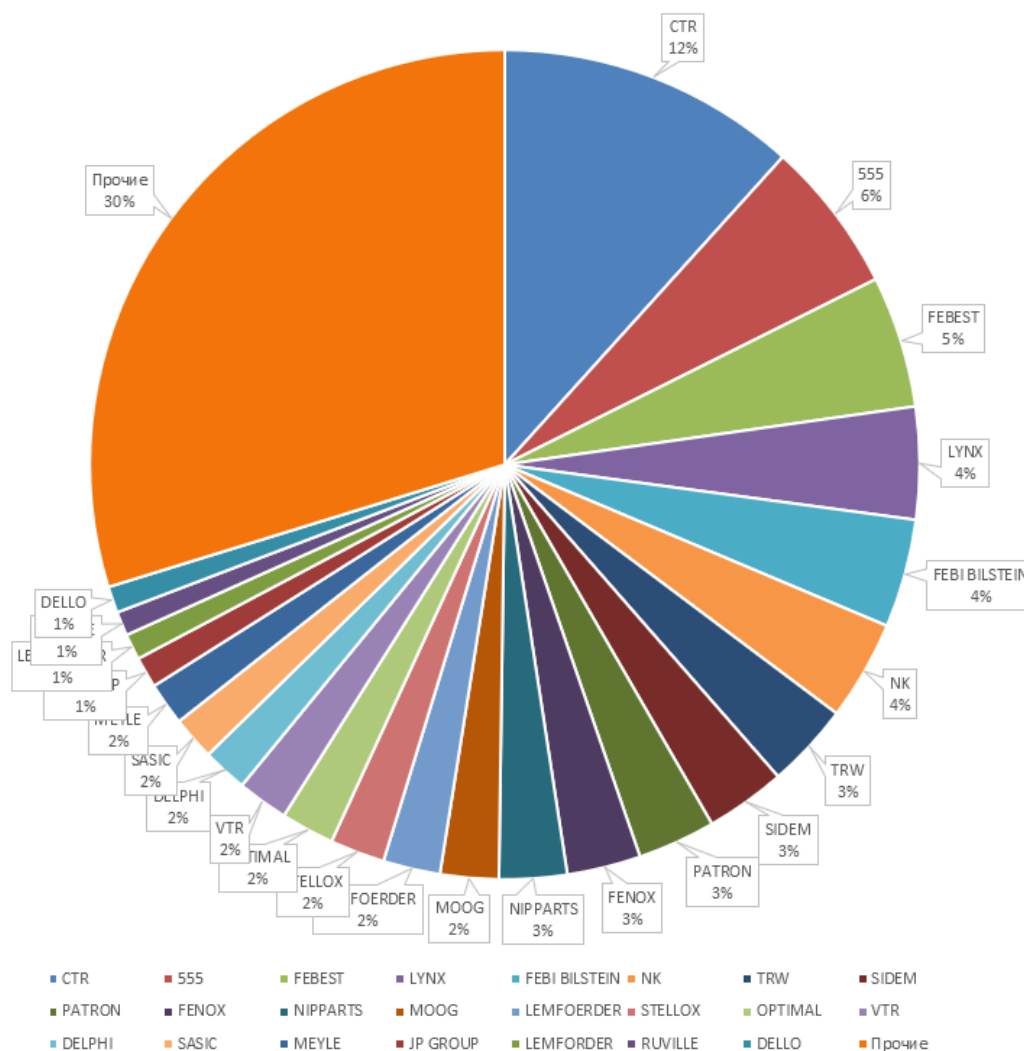


Рисунок 5 – Диаграмма продаж деталей подвески.

На данном рисунке неизвестные производители занимают 30%, в то время как самая большая часть качественных брендовых изделий занимает всего лишь 12% - детали фирмы CRT.

На рисунке 6 представлена диаграмма продаж автомобильных фильтров (маслянных, воздушных, топливных и т.д.).

Фильтры

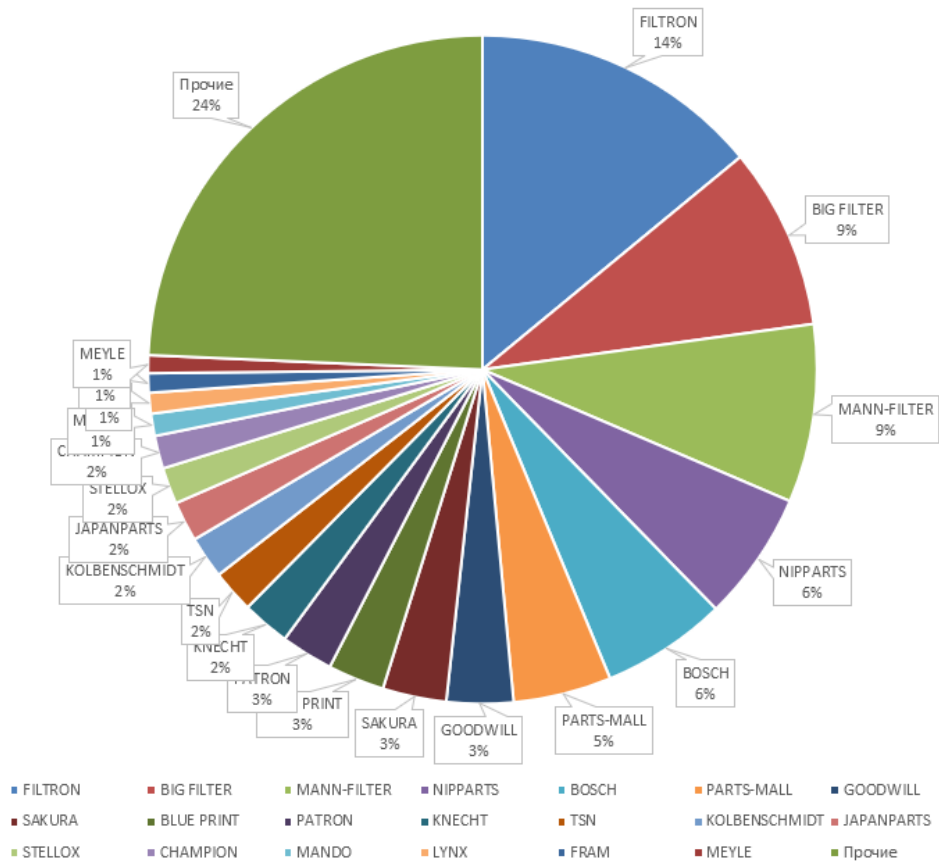


Рисунок 6 – Диаграмма продаж фильтров

На данном рисунке 24% продаж занимают неизвестные производители. Что может негативно сказаться на техническом состоянии автомобиля. На рисунке 7 представлена диаграмма продаж ремней и роликов.

Ремни и Ролики

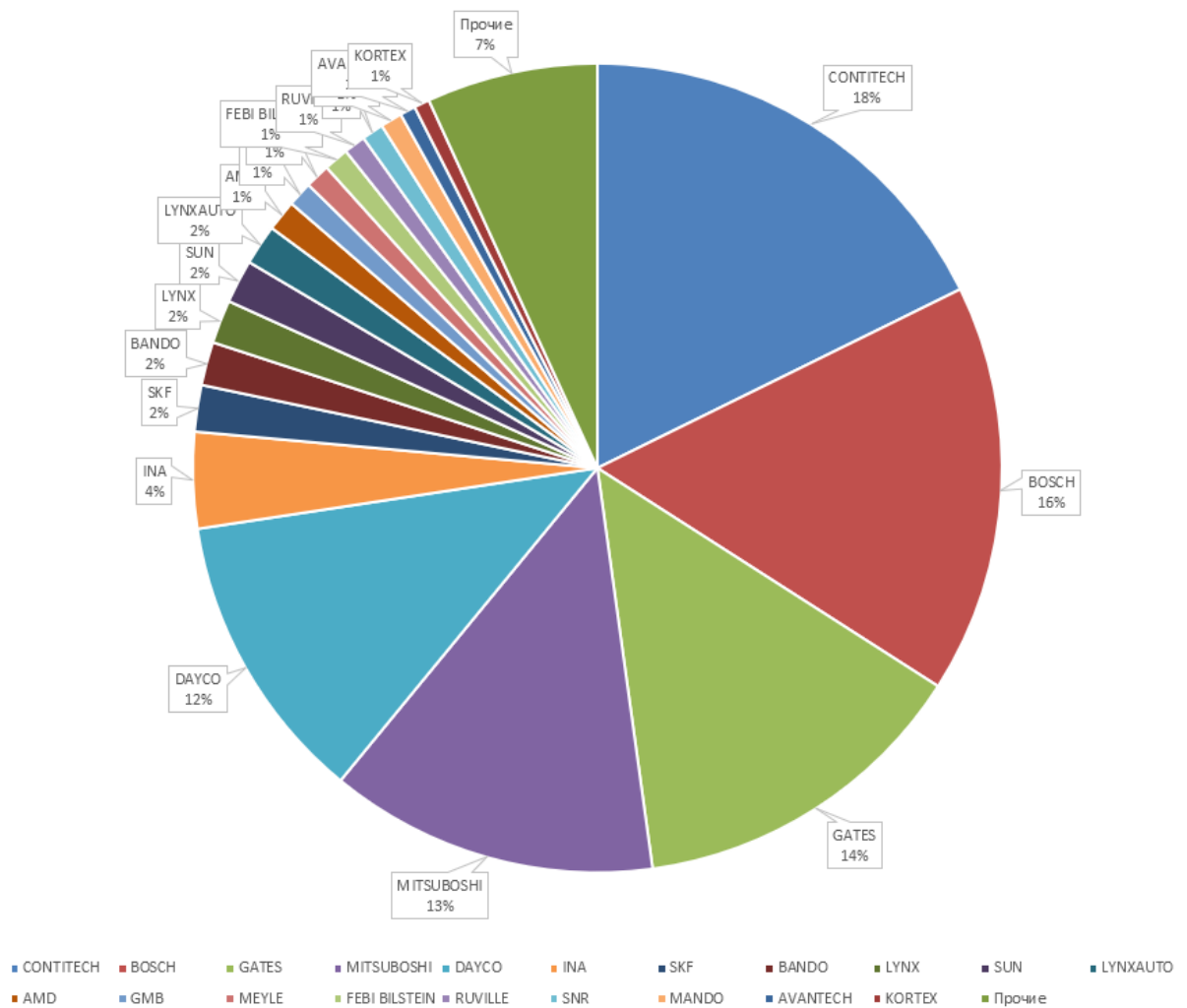


Рисунок 7 – Диаграмма продаж ремней и роликов.

Самое большое значение по продажам занимает фирма CONTITECH – 18%. Далее идет фирма BOSCH- 16%, GATES – 14%, MITSUBISHI – 13%, DAYCO – 12%. Из чего можно сделать выводы, что покупатели не экономят на этих запасных частях. Возможно от части потому, что цены на эти детали довольно невысокие.

На рисунке 8 изображена диаграмма продаж автомобильных ламп.

Автолампы

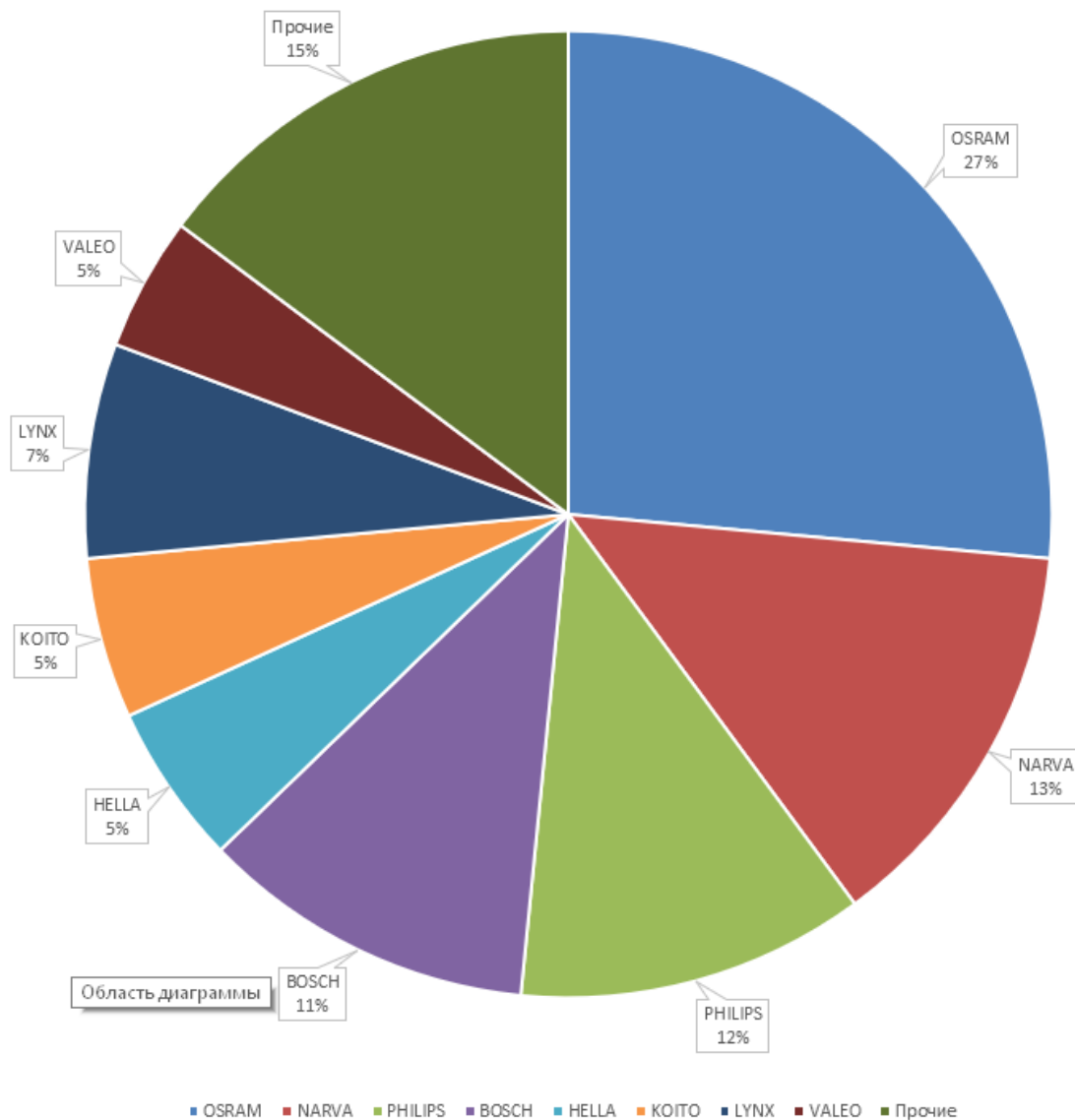


Рисунок 8 – Диаграмма продаж автомобильных ламп.

Большую часть продаж автоламп занимают брендовые производители. Наибольший процент продаж у фирмы OSRAM – 27%, т.к. производитель предоставляет широкий выбор по приемлимой цене.

На рисунке 9 представлена диаграмма продаж радиаторов.

Радиаторы

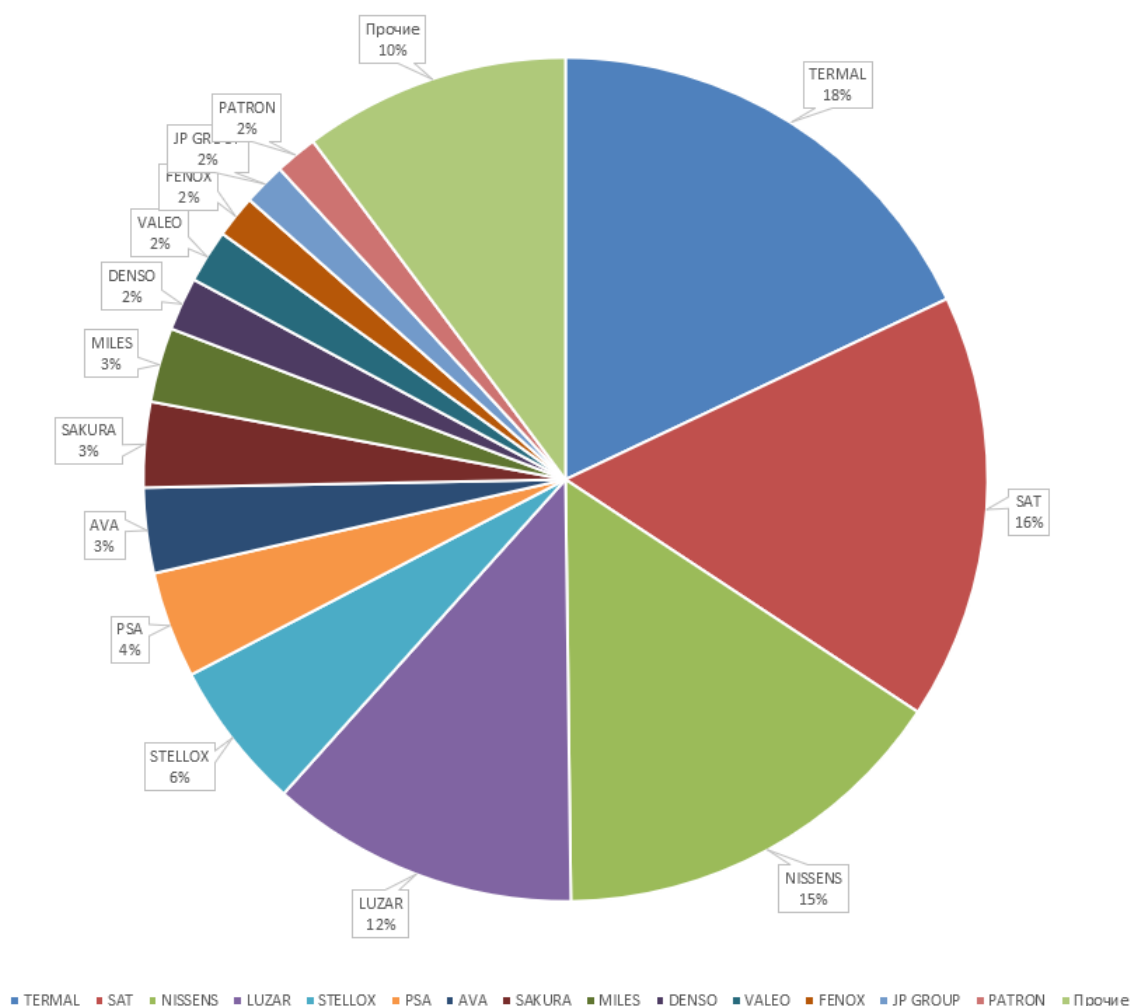


Рисунок 9 – Диаграмма продаж радиаторов

Радиаторы – продукт не дешевый. Радиаторы напрямую связаны с системой охлаждения двигателя, а также с отоплением и кондиционированием салона. Если пренебрегать качеством в угоду цене, то это может напрямую сказаться на техническом состоянии автомобиля. На пример, течь в радиаторе системы охлаждения может привести к перегреву ГБЦ, что в свою очередь приведет к капитальному ремонту двигателя. На диаграмме мы можем видеть, что потребитель предпочитает качественные изделия фирм TERMAL – 18%, SAT – 16%, NISSEN – 15%, а также LUZAR – 12%.

На рисунке 10 изображена диаграмма продаж свечей зажигания.

Свечи зажигания

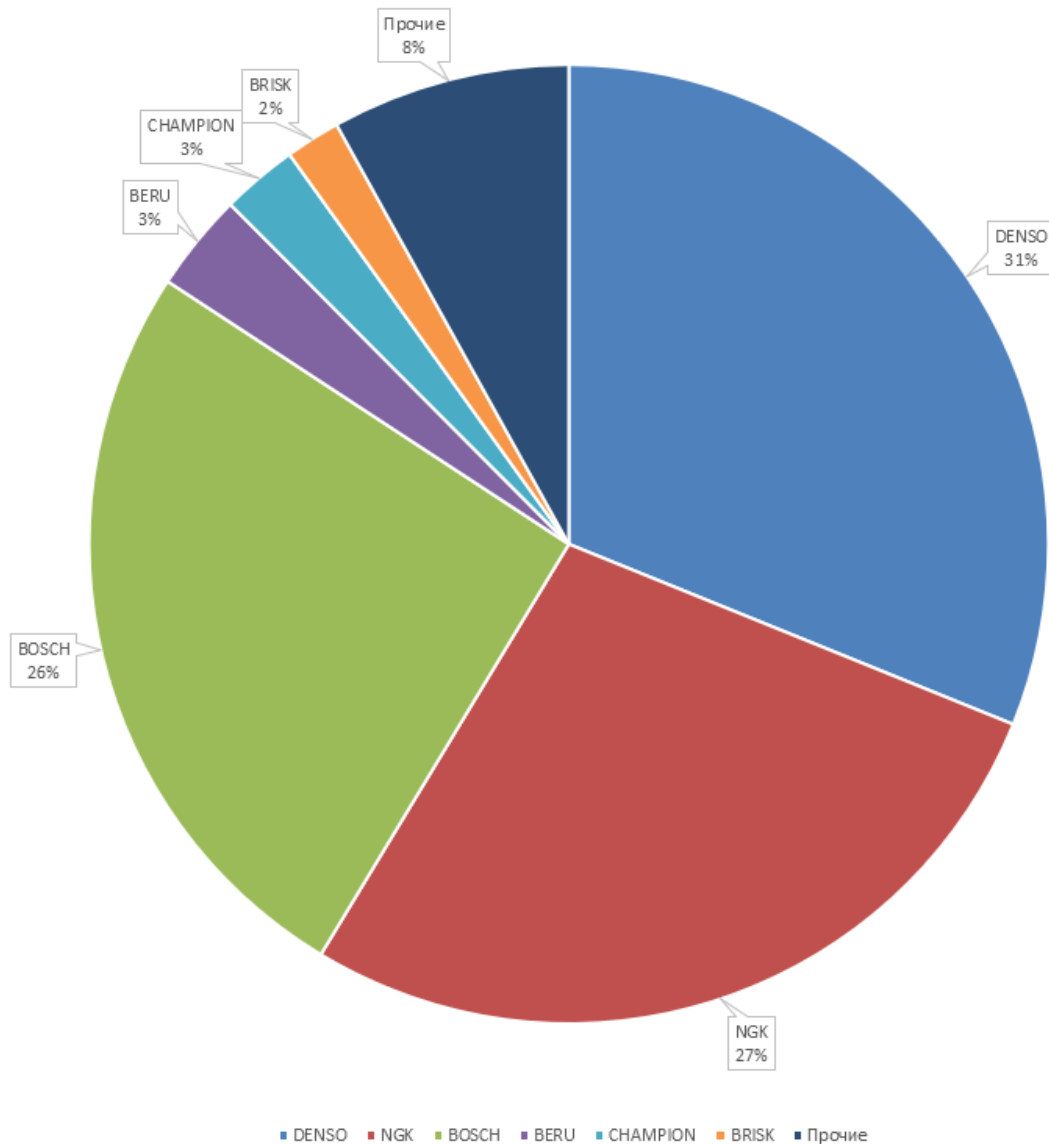


Рисунок 10 – диаграмма продаж свечей зажигания.

Свечи зажигания бывают разных типов:

- Стандартные свечи с одним электродом. Как правило используются на простых рядных двигателях.
- Многоэлектродные свечи. В таких свечах несколько дополнительных боковых электродов, что позволяет увеличить ресурс работы и сжигать топливо в камере сгорания практически полностью.
- Иридиевые свечи. Центральный электрод выполнен из иридия. Большой ресурс.
- Платиновые свечи. Центральный электрод выполнен из платины. Большой ресурс.
- Свечи накала. Используются в дизельных двигателях, помогают нагревать дизельное топливо до необходимой температуры сгорания.

Пренебрежение свечами зажигания может привести к некорректной работе двигателя. На диаграмме видно, что покупатели предпочитают качественные товары.

На рисунке 11 изображена диаграмма продаж тормозных дисков.

Тормозные диски

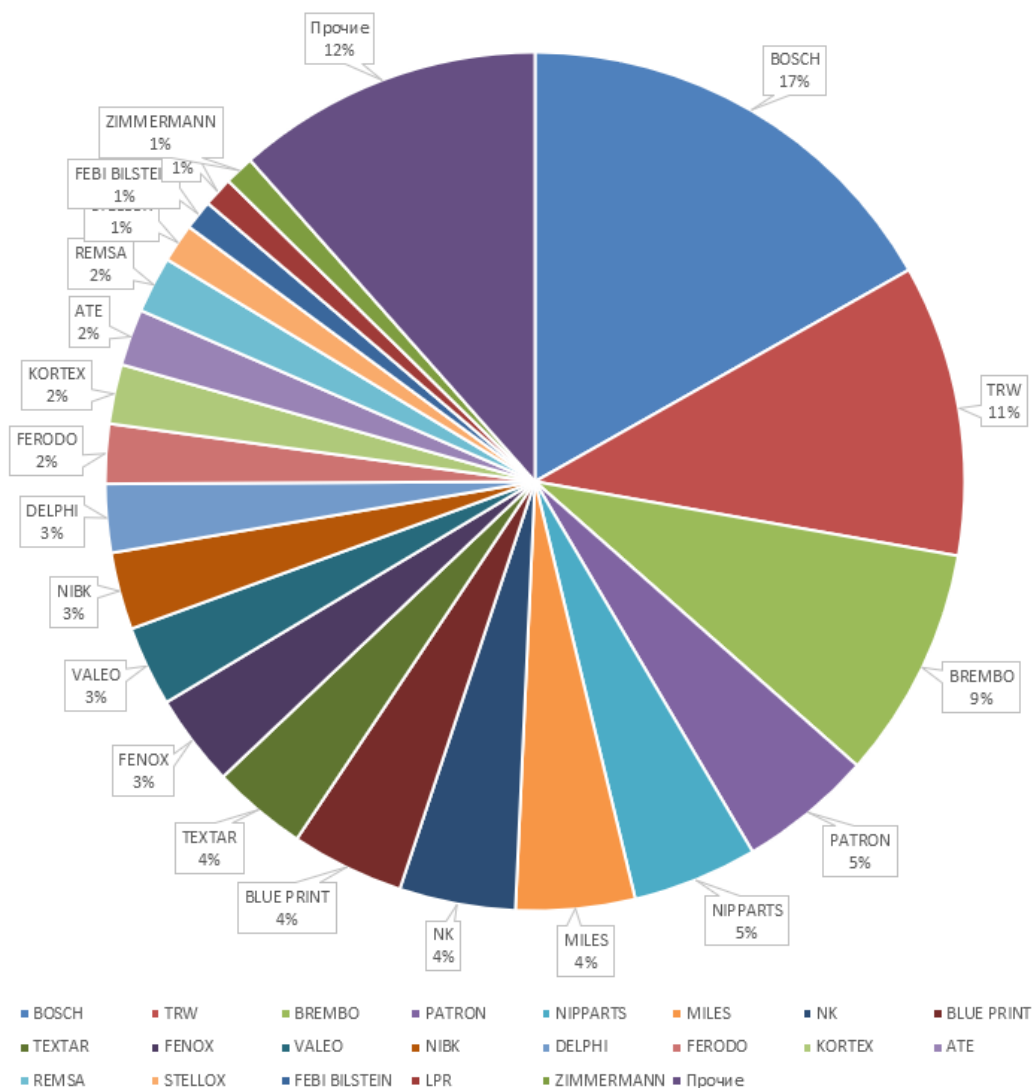


Рисунок 11 – Диаграмма продаж тормозных дисков

На рисунке 12 изображена диаграмма продаж сцепления, что включает в себя выжимной диск сцепления, корзину сцепления, выжимной подшипник и т.д.

Сцепление

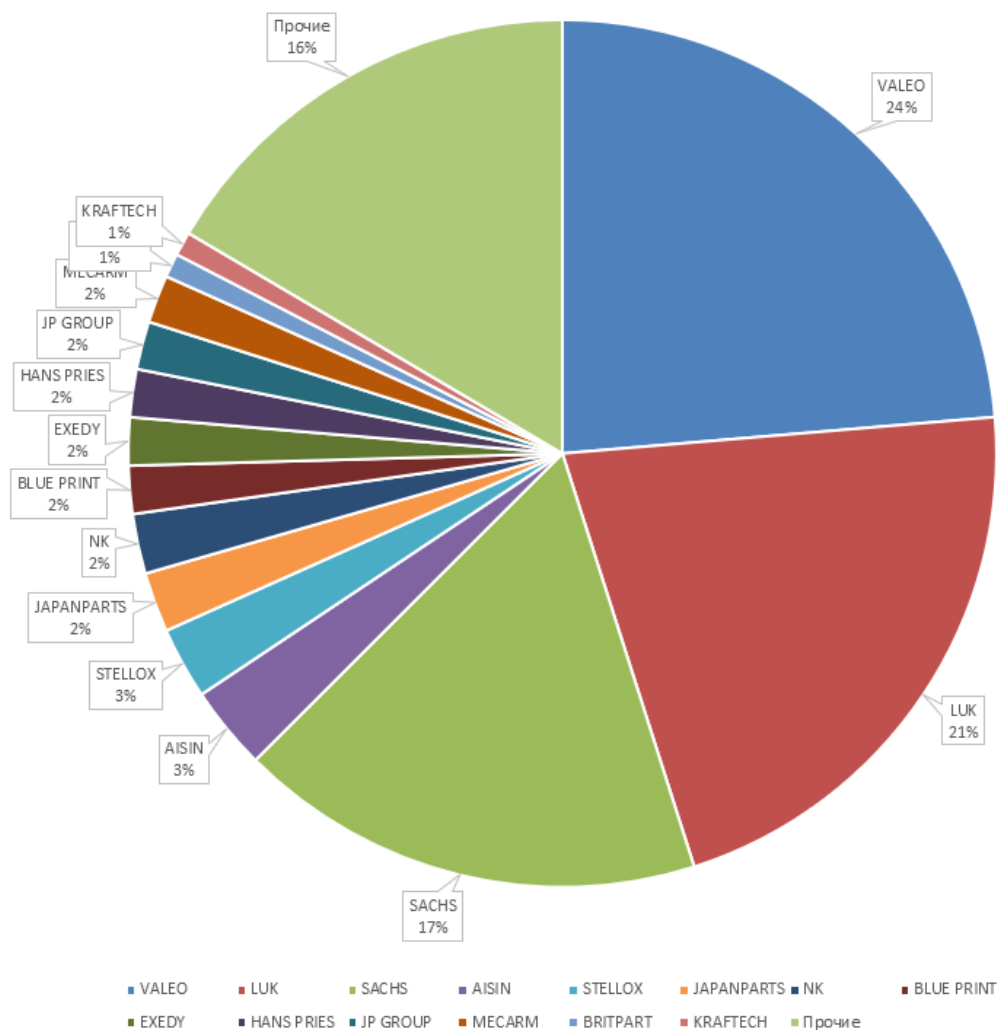


Рисунок 12 – Диаграмма продаж сцепления

Диаграммы составлялись исходя из ассортимента производителей. На рисунке 13 представлены 40 крупных брендовых производителей по ширине ассортимента. Ассортимент брендов – Количество уникальных наименований, представленных в прайсах поставщиков (ШТ).

Бренд	Ассортимент	Бренд	Ассортимент
PATRON	10 118	SACHS	3 235
FEBI BILSTEIN	8 379	AJUSA	3 141
TRW	6 397	LESJOFORS	3 042
BOSCH	5 837	MAPCO	3 010
HANS PRIES	5 540	JAPANPARTS	2 943
NK	5 309	GATES	2 861
DELPHI	5 086	VALEO	2 842
SWAG	4 931	BLUE PRINT	2 807
OPTIMAL	4 419	LPR	2 740
MEYLE	4 417	TYC	2 731
NIPPARTS	4 189	SKF	2 619
REINZ	3 938	MONROE	2 572
CORTECO	3 792	SIDEM	2 514
JP GROUP	3 767	PMC	2 512
FEBEST	3 711	MOOG	2 424
LEMFOERDER	3 608	SNR	2 231
DEPO	3 569	KNECHT	2 069
KAYABA	3 487	CONTITECH	1 930
RUVILLE	3 325	MANN-FILTER	1 913
ELRING	3 303	LUK	1 903

Рисунок 13 – Ассортимент производителей.

Критерии выбора автомобильных запчастей покупателями представлены на рисунке 14. Было опрошено более 8000 тысяч автовладельцев из которых 86,6% - владельцы иномарок, а 13,4 – владельцы отечественных автомобилей. Голосование производилось по десяти критериям:

- Качество
- Цена
- Личный опыт
- Наличие гарантии от производителя
- Марка
- Отзывы (в т.ч. из сети интернет)
- Рекомендации друзей
- Рекомендации сервисов
- Рекомендации газет, журналов

- Рекомендации продавцов
Критерии оценивались по 5-тибалльной шкале.

Значимость критериев выбора запчастей и расходников

Оценка в баллах от 1 до 5



Рисунок 14 – Критерии выбора автомобильных запасных частей

Решающим критерием стало качество деталей – 4,86 балла, а также цена – 4,38 балла и личный опыт – 4.35 балла.

1.7 Доставка деталей клиенту

Как правило, цены на автозапчасти у поставщиков одинаковые и значительно не отличаются. Исходя из этого, можно утверждать, что для привлечения и удержания клиента, продавцу нужно создавать выгодные для клиента условия, т.е систему лояльности.

Исходя из собственного опыта, клиент хочет видеть нужные ему запчасти в наличии у продавца, а также получить их в самые короткие сроки.

Существуют несколько способов доставки автомобильных деталей в пределах города:

- **Самовывоз.** Если деталь в наличии у продавца, то клиент забирает ее самостоятельно в пункте вывоза (магазин, склад). Не самый удобный способ т.к. клиент тратит свое личное время на поездку в пункт самовывоза.

- **Доставка курьером.** За отдельную плату в назначенное время деталь привезет курьер лично Вам в руки. Этот вариант хорош тем, что клиенту не придется отвлекаться от своих дел и планировать поездку за деталью самостоятельно.

- **Доставка такси.** Как правило используется редко и при особо срочных заказах. Оплачивается отдельно и не бывает бесплатной.

Если же речь идет о доставке по России, то этим занимаются транспортные компании.

Некоторые компании занимаются бесплатной доставкой товаров от N-ой суммы заказа. На пример доставка заказа на сумму от пяти тысяч рублей будет для клиента бесплатна в пределах города. Так же существует вариант доставки за символическую плату 100-200 рублей при заказе товара, к примеру, на сумму от трех до пяти тысяч рублей.

Также можно рассмотреть доставку товара дронами, особенно актуальную во время пандемии или кризиса. Это сведет затраты на содержание автопарка и курьеров. Из явных плюсов доставки дронами можно выделить:

- Отсутствие затрат на топливо
- Отсутствие пробок на дорогах
- Низкая стоимость электроэнергии
- В некоторых случаях, отсутствие оператора
- Доставка в любую точку города в короткие сроки

Дроны могут быть как беспилотными, так и управляться оператором. В случае беспилотных дронов, доставка осуществляется по заданному маршруту автоматически, после чего беспилотник вернется на свою базу. В случае, если дрон управляется оператором, то маршрут доставки контролируется человеком с помощью видеокамеры установленной на аппарате.

Если учитывать ситуацию в стране на данный момент (пандемию CoVid), то такая система доставки исключила контакты людей друг с другом, тем самым предотвратив более быстрое распространение заболевания.

Выводы по главе

В этой части представлен обзор рынка запасных частей. Представлены варианты конкуренции между оптовыми продавцами, статистика продаж автомобилей, а также статистика продаж запасных частей по наименованию бренда производителя. Рассмотрены дополнительные варианты доставки товара.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Введение

Задача инвентаризации маршрутизации (IRP) учитывает одновременно управление запасами, управление транспортировкой и их координацию. IRP играет важную роль в снижении стоимости системы и повышении эффективности компаний (Rahimi et al., 2017). IRP имеет широкий спектр приложений в традиционной коммерции и электронной коммерции. Одно из приложений исходит из системы цепочки поставок P & G и Wal-Mart (Yu et al., 2009a), где P & G можно рассматривать как центральный склад, доставляющий товары в магазины Wal-Mart (то есть, клиенты). Другое приложение поступает из системы цепочки поставок электронной коммерции, например, Amazon и IKEA, где производитель отвечает за доставку продуктов в продуктовые центры. Хотя были проведены различные работы, исследующие IRP, большинство из них ориентированы на постоянные и динамичные запросы клиентов (Savelsbergh and Song, 2008, Raa and Aghezzaf, 2009, Solyali and Süral, 2011, Michel and Vanderbeck, 2012, Adulyasak et al., 2014).

Практики и исследователи сходятся во мнении: стратегии распределения должны полностью учитывать неопределенные требования клиентов, на которые может повлиять быстро меняющийся рынок, изменение цен и продвижение продукции. Игнорирование неопределенностей может иметь плохие последствия, такие как потеря потенциальных продаж, раннее исчерпание денежного потока и потеря новых инвестиционных возможностей. В большинстве существующих работ рассматривается стохастический IRP при дискретных сценариях или известных распределениях вероятностей. Однако, согласно Wagner, 2008, Delage and Ye, 2010, полная информация о распределении может быть недоступна из-за следующих факторов: (i) трудно получить информацию о новых продуктах, (ii) реакции клиентов не могут быть быстро собраны и проанализированы во времени, (iii) последствия непредвиденных событий и бизнес-стратегий конкурентов не могут быть точно оценены.

Кроме того, высокий уровень обслуживания клиентов является одной из целей компаний. Принятие решений и удовлетворенность клиентов в значительной степени зависит от уровня обслуживания. Vijvank и Vis (2012) указывают, что удовлетворенность клиентов обычно используется в качестве стратегии дифференциации среди конкурентов. В большинстве существующих работ основное внимание уделяется измерению уровня обслуживания с помощью скорости задержки доставки или дефицита в условиях детерминированной проблемы, или известного распределения вероятности неопределенных параметров, а также учета уровня обслуживания в качестве ограничения проблемы. В этой системе у каждого клиента есть свой склад, и его опустошение или переполнение может привести к большим потерям для компании, таким как огромные затраты, низкая

удовлетворенность и лояльность клиентов (Rahimi et al., 2017). Следующей целью является уровень обслуживания (клиента), который измеряется вероятностью совместного недопущения дефицита и соблюдения складских мощностей для всех клиентов в конце каждого периода.

Кроме того, склад каждого клиента обладает многофункциональным оборудованием и имеет работников различной квалификации. Правильное объединение и управление этими ресурсами может значительно снизить стоимость обработки склада и улучшить производительность. Такое оборудование и рабочие комбинации можно рассматривать как модули обработки с различными возможностями, характеристиками или определенной компетенцией. На практике, выбор модуля обработки является решением тактического уровня. Как только модуль обработки выбран, он остается неизменным в течение горизонта планирования. Поэтому в данной работе выбор модуля обработки рассматривается как решение тактического уровня.

В этой части работы исследуется надежно распределенный IRP с различными альтернативными модулями обработки и ограниченным бюджетом, известна только частичная информация о распределении потребностей клиентов (т.е. Среднее значение и ковариационная матрица). Проблема показана на рис. 15, которая состоит в том, чтобы определить: (i) выбор модуля управления складом клиента на тактическом уровне, (ii) маршруты и объемы доставки транспортными средствами в каждом периоде, (iii) количество запаса клиента в каждом периоде в операционный уровень. Цель состоит в том, чтобы максимально повысить уровень обслуживания. В частности, контролируется вероятность или риск того, что общая стоимость системы превысит бюджет.

Работа включает в себя:

(1) Исследование нового стохастического IRP с частичной распределительной информацией о потребностях клиентов, ограниченным бюджетом и выбором модулей обработки.

(2) Для этой проблемы предложена новая распределенная надежная формулировка с ограничением вероятности, в которой целевая функция является вероятностной, а риск превышения системой стоимости бюджета контролируется случайным ограничением.

(3) На основе двух методологий аппроксимации для частичного известного распределения вероятностей предложены метод выборочного среднего приближения (SAA) и иерархический подход, соответственно.

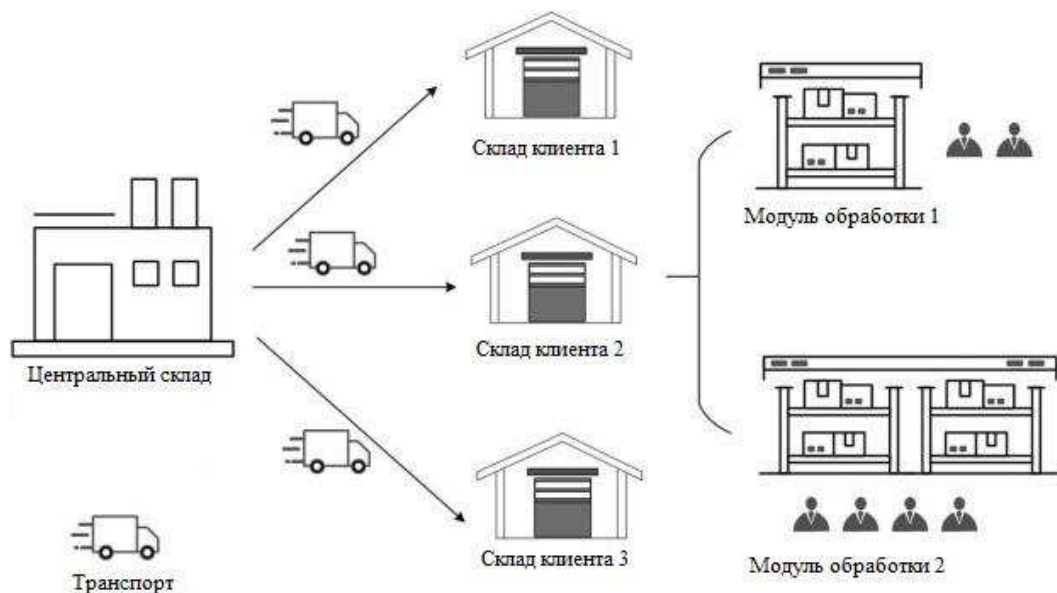


Рис. 15. Наглядный пример.

2.1. IRP с неопределенными требованиями клиентов

В большинстве существующих работ рассматривается IRP со стохастическими требованиями клиентов в соответствии с заданным набором сценариев или известным распределением вероятностей.

Huang и Lin (2010) рассматривают IRP с несколькими пунктами с нормально распределенными требованиями, чтобы минимизировать общую стоимость. Разработана формулировка смешанного целочисленного программирования (MIP) и алгоритм оптимизации колонии муравьев. Solyali et al. (2012) исследовали надежный IRP, где неопределенные требования ограничены в интервале. Надежная оптимизация достигается за счет контроля бюджета неопределенности, который измеряет защиту от неопределенности. Разработаны две формулировки MIP и алгоритм ветвления и разреза. Bertazzi et al. (2013) изучил IRP с известным дискретным распределением вероятностей спроса, чтобы минимизировать общую стоимость. Предложена формулировка динамического программирования (DP) и алгоритм развертывания. Shukla et al. (2013) исследовал IRP с известным распределением вероятностей требований, чтобы минимизировать общую стоимость. Предложены MIP-формулировка и наборы алгоритмов, основанные на эволюционных алгоритмах (EAs). Rahim et al. (2014) рассмотрел IRP с нормально распределенными требованиями, чтобы минимизировать общую стоимость системы. MIP со стохастическими параметрами и приближенной детерминированной моделью. Bertazzi et al. (2015) изучил IRP с известными дискретными распределениями вероятностей требований, чтобы минимизировать общую стоимость. Они показывают, что ожидаемые затраты, основанные на детерминированной формулировке (то есть, используя средний спрос), хуже, чем при распределении вероятностей. Soysal et al. (2015) исследовал IRP с нормально распределенными требованиями клиентов, учитывая выбросы CO₂ и расход топлива, чтобы минимизировать общую

стоимость системы. Agra et al. (2018) рассматривают стохастическую IRP с заданным набором сценариев требований, чтобы минимизировать общую стоимость системы. Разработан метод SAA и несколько эвристических алгоритмов доставки.

Итак, насколько известно, исследования, рассматривающие стохастический IRP, где известна только частичная информация о распределении требований клиентов, очень редки.

2.2. IRP с учетом уровня обслуживания

Большинство существующих работ посвящено рассмотрению уровня обслуживания в качестве проблемного ограничения (Bijvank and Vis, 2012, Yu et al., 2012, Singh et al., 2015) или измерению уровня обслуживания по скорости задержки доставки или дефициту в условиях детерминированности. Параметры задачи или известное распределение вероятностей неопределенных параметров.

Поэтому, насколько известно, нет стохастического IRP с частичной информацией о распределении по неопределенным требованиям, чтобы максимизировать уровень обслуживания, который измеряется вероятностью совместного обеспечения отсутствия на складе и соблюдения возможностей склада для всех клиентов.

2.3. Модули обработки

На практике выбор модуля обработки может повысить эффективность и производительность склада. Однако большинство существующих работ, касающихся модулей обработки, в основном сосредоточены на проблемах с местоположением объекта. Литература по IRP, касающаяся обработки модулей для инвентаризации, встречается очень редко.

Li et al. (2011) исследуют проблему размещения двухступенчатого емкостного объекта с учетом затрат на обработку и перегрузку. Данный альянс рабочих и оборудования, обладающий как пропускной способностью, так и стоимостью обработки, моделируется как один модуль обработки. Ограниченный набор модулей обработки оборудован в каждом пункте хранения, где стоимость обработки модуля понесена, как только модуль используется. После этого Li et al. (2014) исследуют проблему местоположения объекта из нескольких продуктов, где рассматриваются различные модули обработки. Irawan and Jones (2018) рассматривают проблему местоположения объекта, где должны быть определены местоположения распределительных центров, и каждый центр имеет несколько уровней пропускной способности, то есть выбираются модули обработки.

Склад обладает различным оборудованием и рабочими. Правильный выбор комбинации оборудования и рабочих может значительно улучшить производительность системы. Тем не менее, насколько известно, в IRP нет результатов для совместного рассмотрения модулей обработки.

2.4. Распределенно устойчивые подходы

При частичной информации о распределении неопределенных потребностей трудно и непрактично получать достаточные и репрезентативные исторические данные для точной оценки распределения вероятности (Wagner, 2008, Delage and Ye, 2010, Ben-Tal et al., 2013). Для таких задач распределенно устойчивые подходы к оптимизации показали большую мощность (Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2017, Zhang et al., 2018), которые включают два популярных класса подходов: (i) преобразование исходных задач в задачи детерминированной оптимизации на основе случайных выборок, среди которых метод SAA широко и успешно применяется (Luedtke and Ahmed, 2008, Zhang et al., 2015); (ii) другой класс фокусируется на использовании выпуклых приближений (Nemirovski and Shapiro, 2006), которые обычно основаны на наборах неоднозначностей, которые, как предполагается, включают истинное распределение вероятностей.

Сфера IRP расширяется, чтобы максимизировать уровень обслуживания в соответствии с (i) информацией о частичном спросе, (ii) выбором модуля обработки и (iii) бюджетом с ограниченным капиталом.

2.5. Описание проблемы

В этой части рассматривается стохастическая IRP с модулями обработки и ограниченным капитальным бюджетом. Рассматриваемая проблема включает в себя центральное депо 0, набор клиентов $\{1, 2, \dots, n\}$ и парк транспортных средств, как показано на рис. 1. Обратите внимание, что на полном графике набор используется для обозначения набора узлов, включая центральный склад и клиентов. В проблеме:

(1) Центральное депо можно рассматривать как центрального продавца или производителя, мощность которого предполагается неограниченной (Yu et al., 2008, Yu et al., 2012). Центральное депо 0 отвечает за распределение продуктов среди клиентов через парк однородных транспортных средств с заданной вместимостью. Предполагается, что количество транспортных средств и поездок на транспортных средствах в каждом периоде не ограничены (Yu et al., 2012).

(2) Учитывая планируемый временной горизонт $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, |T|\}$, спрос клиента $i \in N \setminus \{0\}$ в период $t \in T$ является стохастическим и обозначается как ξ_{it} и $\xi_i = [\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{i|T|}]^T$. Известно только частичное знание распределения, то есть среднего и ковариационной матрицы. Кроме того, спрос клиента может быть разделен и удовлетворен двумя или более транспортными средствами.

(3) У каждого клиента $i \in N \setminus \{0\}$ есть свой склад. Другими словами, каждый покупатель оборудован специальным складом, который находится по месту нахождения соответствующего покупателя. Склад каждого клиента

обладает различным оборудованием и рабочими. Различные комбинации этих ресурсов рассматриваются как модули обработки с соответствующими складскими мощностями и затратами на обработку.

(4) Системный бюджет капитала B предопределен, и вероятность или риск для общей стоимости системы, превышающей бюджет капитала, должны контролироваться.

Как указано выше, точное распределение вероятностей требований клиентов, обозначенное ниже, неизвестно. Дан ограниченный набор выборок, включая исторические данные о потребностях клиентов $\{\xi_i^r\}_{r=1}^{|R|}$, где R обозначает набор выборок, проиндексированных r и $\xi_i^r = [\xi_{i1}^r, \xi_{i2}^r, \dots, \xi_{i,|T|}^r]^T$ под выборкой $r \in R$. Затем эмпирический средний вектор μ_i и ковариационная матрица Σ_i потребительского спроса рассчитываются следующим образом:

$$\mu_i = \frac{1}{|R|} \sum_{r \in R} \xi_i^r, \Sigma_i = \frac{1}{|R|} \sum_{r \in R} (\xi_i^r - \mu_i)(\xi_i^r - \mu_i)^T, \forall i \in N \setminus \{0\},$$
 где $(\cdot)^T$ обозначает транспонирование вектора в скобках.

2.6. Распределенная устойчивая формулировка

В этой части предложена распределенная устойчивая формулировка проблемы с ограничением случайности. Далее базовые обозначения, определяем переменные решения, а затем предлагается формулировка.

Распределенная устойчивая формулировка [P1]:

$$\maxinf_{\mathbb{P}} \left\{ \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\begin{array}{l} 0 \leq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih}, \\ \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \end{array} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{h \in H} z_{ih} = 1, \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijt} = \sum_{j \in N, j \neq i} x_{jit}, \forall i \in N, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} y_{jit} - \sum_{j \in N, j \neq i} y_{ijt} = q_{it}, \forall i \in N, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} y_{oit} = \sum_{i \in N \setminus \{0\}} q_{it}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$y_{ijt} \leq C \cdot x_{ijt}, \forall i \in N, j \in N \setminus \{0\}, j \neq i, t \in T \quad (6)$$

$$\inf_{\mathbb{P}} \left\{ \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} \max\{I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, 0\} \cdot c_{it}^{inv} \\ + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} c_{ij} \cdot y_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} f_t \cdot x_{iot} \\ + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{io}^b \cdot x_{iot} + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{h \in H} c_h^a \cdot z_{ih} \leq B \end{array} \right) \right\} \geq 1 - \alpha \quad (7)$$

$$q_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \quad (8)$$

$$y_{ijt} \geq 0, \forall i, j \in N, j \neq i, t \in T \quad (9)$$

$$x_{ijt} \in \mathbb{Z}^+, \forall i, j \in N, i \neq j, t \in T \quad (10)$$

$$z_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i \in N \setminus \{0\}, h \in H \quad (11)$$

В (1) используется $\inf_{\mathbb{P}}\{\cdot\}$ для обозначения сценария наихудшего случая, то есть устойчивости, и $\text{Prob}_{\mathbb{P}}(\cdot)$ для обозначения вероятности события в скобках при распределении вероятности \mathbb{P} . Следует отметить, что известна только частичная информация о распределении вероятностей \mathbb{P} , то есть среднее значение и ковариационная матрица. Задача (1) - максимизировать уровень обслуживания, который измеряется вероятностью совместного обеспечения (i) отсутствия запасов для всех клиентов в конце каждого периода, т. е.,

$$I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \text{ и (ii) соблюдение}$$

складских мощностей для всех клиентов в конце каждого периода, т.е.

$$I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \sum_{h \in H} W_{ih} \cdot z_{ih}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T.$$

Ограничение (2) гарантирует, что должен быть выбран один модуль обработки для склада клиента, где $i \in N \setminus \{0\}$. Ограничение (3) подразумевает, что количество транспортных средств, покидающих узел $i \in N$, равно количеству транспортных средств, прибывающих в i . Ограничение (4) обозначает сохранение потока, которое также служит подстраховкой. Ограничение (5) подразумевает, что общий объем продукции, транспортируемой из центрального склада, равен общему объему доставки всем клиентам за период $t \in T$. Ограничение (6) учитывает возможности транспортных средств. Ограничение (7) ограничивает вероятность превышения бюджета меньше, чем, если общая стоимость включает (i) стоимость хранения запасов для всех клиентов, т.е.

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot (\max\{I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, 0\}), \text{ и (ii)}$$

переменные транспортные расходы, т.е. $\sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} c_{ij} \cdot y_{ijt}$, и

(iii) фиксированные транспортные расходы, т.е. $\sum_{t \in T} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} f_t \cdot x_{i0t}$, и

(iv) транспортные расходы для пустых транспортных средств, едущих от клиентов до центрального склада, т.е. $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{i0}^b \cdot x_{i0t}$, и (v) общие

фиксированные затраты на выбор модуля обработки, т.е.

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{h \in H} c_h^a \cdot z_{ih}. \text{ Ограничения (8), (9), (10), (11) дают области}$$

переменных решений.

2.7 Решение подходов

Общеизвестно, что трудно получить точные решения для общих стохастических программ (Birge and Louveaux, 2011). По данным Zymler et al. (2013), при частичной информации о распределении, случайные проблемы могут быть решены только с помощью консервативного приближения. В этой работе целевая функция является вероятностной. Таким образом, проблема еще сложнее, и получение точного решения довольно сложно. Чтобы лучше

решить проблему, сначала предлагается эквивалентное преобразование исходной целевой функции, приводящее к эквивалентной модели [P2]. Затем предлагаются два популярных метода аппроксимации для [P2], то есть метод SAA и метод аппроксимации, основанный на множестве неоднозначностей для частично известного \mathbb{P} . Основанный на методе второго приближения, MIP-иерархический подход получил дальнейшее развитие.

2.8. Эквивалентная формулировка

В этом подразделе путем введения уровня риска $\beta \in [0,1]$, исходная вероятностная целевая функция может быть эквивалентно преобразована как:

$$\begin{aligned} \min & \quad \beta \\ \text{s. t.} & \quad \inf_{\mathbb{P}} \left\{ \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\begin{array}{l} 0 \leq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih}, \\ \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \end{array} \right) \right\} \geq 1 - \beta, \end{aligned} \quad (12)$$

где уровень риска β подразумевает максимальную вероятность существующего дефицита или переполнения склада клиента, и β рассматривается как переменная решения. Для задачи максимизация вероятностной целевой функции (1) согласуется с минимизацией β при одновременном выполнении совместного случайного ограничения (12). Соответственно, исходная формулировка [P1] может быть эквивалентно преобразована в следующую модель:

$$\begin{aligned} [\text{P2}]: \min & \quad \beta \\ \text{s. t.} & \quad (2) - (12) \end{aligned}$$

При частичной информации о распределении трудно решить [P2], вызывая коммерческие решатели из-за вероятностного ограничения (7) и совместного случайного ограничения (12). Таким образом, методы приближения развиваются в следующем.

2.9. SAA

Основная идея SAA заключается в решении задач стохастической оптимизации с помощью моделирования Монте-Карло и методов детерминированной оптимизации (Kleywegt et al., 2002, Hu et al., 2012). Для исследуемой проблемы известны только частичные знания о распределении потребностей клиентов, то есть среднее значение и ковариационная матрица. Основываясь на идее SAA, заменяем частично известное распределение \mathbb{P} на эмпирическое, которое удовлетворяет заданным условиям, соответствующим Ω конечному набору случайно сгенерированных сценариев. Следуя моделям SAA на основе ожидаемых штрафов (Zhang et al., 2015, Jebali and Diabat, 2017), аппроксимируем случайные ограничения (7), (12) функцией выборочной

средней оценки, которая является взвешенным штрафом объем запасов, объем запасов за пределами складских мощностей и перерасход бюджета. Обратите внимание, что это β может быть сведено к минимуму путем минимизации объема запаса и объема запаса сверх емкости склада. Соответственно, предлагается приближенная модель на основе SAA [P3]. Поскольку выбор модуля обработки рассматривается как тактическое решение, переменная решения z_{il} , обозначающая выбор модуля обработки, не зависит от сценария $\omega \in \Omega$ в [P3].

[P3]:

$$\min \left\{ \frac{1}{|\Omega|} \left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} (\theta_1 \cdot v_{it}(\omega) + \theta_2 \cdot \eta_{it}(\omega)) + \theta_3 \cdot \sum_{\omega \in \Omega} \varphi(\omega) \right) \right\} \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \sum_{h \in H} z_{ih} = 1, \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijt}(\omega) = \sum_{j \in N, j \neq i} x_{jit}(\omega), \forall i \in N, t \in T, \omega \in \Omega \quad (15)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} y_{jit}(\omega) - \sum_{j \in N, j \neq i} y_{ijt}(\omega) = q_{it}(\omega), \forall i \in N, t \in T, \omega \in \Omega \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} y_{oit}(\omega) = \sum_{i \in N \setminus \{0\}} q_{it}(\omega), \forall t \in T, \omega \in \Omega \quad (17)$$

$$y_{ijt}(\omega) \leq C \cdot x_{ijt}(\omega), \forall i \in N, j \in N \setminus \{0\}, j \neq i, t \in T, \omega \in \Omega \quad (18)$$

$$I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is}(\omega) - \sum_{s=1}^t \xi_{is}(\omega) + v_{it}(\omega) \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T, \omega \in \Omega \quad (19)$$

$$I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}(\omega) - \eta_{it}(\omega) \leq \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih}, \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T, \omega \in \Omega \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+(\omega) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} c_{ij} \cdot y_{ijt}(\omega) + \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} f_t \cdot x_{i0t}(\omega) + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{i0}^b x_{i0t}(\omega) \\ & + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{h \in H} c_h^a \cdot z_{ih} - \varphi(\omega) \leq B, \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (21)$$

$$I_{it}^+(\omega) \geq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is}(\omega) - \sum_{s=1}^t \xi_{is}(\omega), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T, \omega \in \Omega \quad (22)$$

$$I_{it}^+(\omega), v_{it}(\omega), \eta_{it}(\omega), \varphi(\omega), q_{it}(\omega) \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T, \omega \in \Omega \quad (23)$$

$$y_{ijt}(\omega) \geq 0, \forall i, j \in N, j \neq i, t \in T, \omega \in \Omega \quad (24)$$

$$x_{ijt}(\omega) \in \mathbb{Z}^+, \forall i, j \in N, i \neq j, t \in T, \omega \in \Omega \quad (25)$$

$$z_{ih} \in \{0,1\}, \forall i \in N \setminus \{0\}, h \in H \quad (26)$$

Задача сводит к минимуму взвешенную сумму ожидаемого объема запаса, ожидаемого объема запаса сверх складских мощностей и ожидаемого перерасхода бюджета, чтобы приблизить случайные ограничения (7), (12) в [P2]. Ограничение (14) является тем же как ограничение (2). Ограничение (15) означает, что количество транспортных средств, прибывающих в узел $i \in N$, и транспортных средств $i \in N$, покидающих, является одинаковым в сценарии $\omega \in \Omega$. Сохранение потока в соответствии со сценарием $\omega \in \Omega$ обеспечивается ограничением (16). Ограничение (17) означает, что центральный склад

отвечает за доставку продуктов всем клиентам по сценарию $\omega \in \Omega$. Ограничение (18) учитывает возможности транспортных средств в соответствии с сценарием $\omega \in \Omega$. Ограничение (19) определяет объем $\omega \in \Omega$ выбытия покупателя $i \in N \setminus \{0\}$ в период $t \in T$ согласно сценарию $\omega \in \Omega$. Ограничение (20) вычисляет объем запаса $\eta_{it}(\omega)$ сверх складской емкости клиента $i \in N \setminus \{0\}$ в период $t \in T$ согласно сценарию $\omega \in \Omega$. Ограничение (21) определяет перерасход бюджета $\varphi(\omega)$ по сценарию $\omega \in \Omega$. Ограничения (22), (23), (24), (25), (26) дают области переменных решения.

Модель МIP [P3] может быть оптимально решена путем вызова коммерческих решателей, таких как CPLEX. Из-за NP-трудной природы проблемы мы наблюдаем, что время вычисления SAA резко увеличивается с размером проблемы. Поэтому для эффективного решения крупномасштабных задач дополнительно разработан двухэтапный иерархический метод.

2.10. Основанный на МIP иерархический подход

В этой части, основываясь на данном среднем значении и ковариации требований клиентов, сначала строится набор неопределенностей, чтобы приблизительно охарактеризовать частичное известное распределение вероятностей \mathbb{P} . Совместное случайное ограничение (12) затем консервативно аппроксимируется набором индивидуальных случайных ограничений через приближение Бонферрони. Кроме того, разработана методика приближения для ограничения случайности, которое ограничивает стоимость системы. Следуя методу аппроксимации неопределенности, то есть допуская неоднозначность, установленную в Delage and Ye (2010), и подходу аппроксимации случайного ограничения, как в Zhang et al. (2017), предложена приближительная формулировка МIP. Исходя из этого, иерархический подход получает дальнейшее развитие.

2.10.1. Набор неопределенности

Набор неоднозначности включает в себя семейство распределений, характеризующихся через известные свойства частичного известного \mathbb{P} . Традиционные наборы неоднозначности фокусируются на точном соответствии заданного среднего значения и ковариационной матрицы неопределенных параметров (El Ghaoui et al., 2003, Calafiore and Ghaoui, 2006). Delage и Ye (2010) строят новый набор неоднозначностей с учетом ошибок оценки, и набор неоднозначностей был успешно применен (Cheng et al., 2013, Zhang et al., 2017). Поэтому, следуя идее Delage and Ye (2010), применяется набор неопределенности $\mathcal{P}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}, \gamma_1, \gamma_2)$, где $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]$ и $\boldsymbol{\Sigma} = [\boldsymbol{\Sigma}_1, \boldsymbol{\Sigma}_2, \dots, \boldsymbol{\Sigma}_n]$ применяется:

$$\mathcal{P}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}, \gamma_1, \gamma_2) = \left\{ \mathbb{P}: \begin{array}{l} (\mathbb{E}_{\mathbb{P}}[\boldsymbol{\xi}_i] - \boldsymbol{\mu}_i)^\top (\boldsymbol{\Sigma}_i)^{-1} (\mathbb{E}_{\mathbb{P}}[\boldsymbol{\xi}_i] - \boldsymbol{\mu}_i) \leq \gamma_1, \\ \mathbb{E}_{\mathbb{P}}[(\boldsymbol{\xi}_i - \boldsymbol{\mu}_i)(\boldsymbol{\xi}_i - \boldsymbol{\mu}_i)^\top] \preceq \gamma_2 \boldsymbol{\Sigma}_i, \forall i \in N \setminus \{0\}. \end{array} \right\}$$

Где $\mathbb{E}[\cdot]$ обозначает ожидаемое значение. Кроме того, $\gamma_1 \geq 0$ и $\gamma_2 \geq \gamma_1$ являются двумя параметрами множества неопределенности $\mathcal{P}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}, \gamma_1, \gamma_2)$, которое ограничивает то, что истинный средний вектор для $\boldsymbol{\xi}_i$ лежит в эллипсоиде с центром $\boldsymbol{\mu}_i$ в радиусе γ_1 , а истинная ковариационная матрица для $\boldsymbol{\xi}_i$ находится в положительном полуопределенном конусе, который ограничен $\gamma_2 \boldsymbol{\Sigma}_i$, где $i \in N \setminus \{0\}$. Таким образом, известное \mathbb{P} частично считается включенным \mathcal{P} , то есть $\mathbb{P} \in \mathcal{P}$ в следующее.

2.10.2. Тожество Бонферрони

В соответствии с неравенством Бонферрони, если известны уровни индивидуального риска ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 , для нарушения неравенств $I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \geq 0$ и $I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih}$, для каждого $i \in N \setminus \{0\}$ и $t \in T$, ограничение (12) может быть аппроксимировано следующими:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}}(I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \geq 0) \geq 1 - \epsilon_{it}^1, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}}(I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih}) &\geq 1 - \epsilon_{it}^2, \\ \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T & \end{aligned} \quad (28)$$

Где ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 ограничены $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} (\epsilon_{it}^1 + \epsilon_{it}^2) \leq \beta$ (Calafiore and Ghaoui, 2006). Ограничение (27) подразумевает, что вероятность отсутствия товара в течение периода не меньше, чем. Ограничение (28) требует, чтобы вероятность отсутствия затоваривания для клиента $i \in N \setminus \{0\}$ в течение периода $t \in T$ была не меньше $1 - \epsilon_{it}^2$.

Качество аппроксимации во многом зависит от выбора отдельных уровней риска, т. е. ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 . Однако, согласно Sun et al. (2014), проблема определения оптимальных уровней индивидуального риска очень сложна и неразрешима. В этой работе применяется популярный подход к множеству ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 , путем равномерного деления, то есть $\epsilon_{it}^1 = \epsilon_{it}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta}{n \cdot |T|}$ (Chung et al., 2012). Следовательно, приближенная модель [P4] с распределенно устойчивыми индивидуальными случайными ограничениями, то есть, Ограничениями (27), (28), формулируется как:

$$\begin{aligned}
[\text{P4}]: \quad & \min \beta \\
\text{s. t.} \quad & (2) - (11), (27), (28) \\
& \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} (\epsilon_{it}^1 + \epsilon_{it}^2) \leq \beta
\end{aligned} \tag{29}$$

$$0 \leq \epsilon_{it}^1, \epsilon_{it}^2, \beta \leq 1, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \tag{30}$$

2.10.4. Аппроксимация случайного ограничения для стоимости системы

Формулирование [P4] трудно решить из-за нелинейного выражения в Ограничении (7), т.е. $\max\{I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, 0\}$. Таким образом, разработано консервативное приближение для ограничения (7). Для этого сначала вводится новая непрерывная и неотрицательная переменная $\psi_{it} \geq 0$. Ограничение (7) может быть аппроксимировано следующими тремя неравенствами:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\psi_{it} \geq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \right) \geq 1 - \alpha \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} c_{ij} \cdot y_{ijt} + \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} f_t \cdot x_{i0t} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{i0}^b x_{i0t} +
\end{aligned} \tag{32}$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{h \in H} c_h^a \cdot z_{ih} \leq B$$

$$\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \tag{33}$$

В соответствии с неравенством Бонферрони, если известен индивидуальный уровень риска α_{it} для $\psi_{it} < I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}$, совместное случайное ограничение (31) может быть аппроксимировано следующими индивидуальными случайными ограничениями:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} (\psi_{it} \geq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}) \geq 1 - \alpha_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \tag{34}$$

Где $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} \alpha_{it} \leq \alpha$ и α_{it} получается путем равномерного деления α , т.е. $\alpha_{it} = \frac{\alpha}{n \cdot |T|}$. Таким образом, формулировка [P2] может быть аппроксимирована следующей случайной моделью [P5]:

$$\begin{aligned}
[\text{P5}]: \quad & \min \beta \\
\text{s. t.} \quad & (2) - (6), (8) - (11), (27) - (30), (32) - (34)
\end{aligned}$$

2.10.5. Примерная формулировка MIP

Из-за устойчиво распределенных случайных ограничений (27), (28), (34), [P5] все еще не может быть решена напрямую путем вызова коммерческих решателей. Применяя метод аппроксимации в Zhang et al. (2017), устойчиво распределенные случайные ограничения могут быть

аппроксимированы (35), (36), (37), соответственно. Соответственно, модель МІР [Р6] предлагается для приблизительной формулировки [Р2]. Далее сначала указываются связанные новые параметры и новые переменные решения, а затем дополнительно представляется [Р6].

Новые параметры:

– γ_1, γ_2, a, b : параметры неопределенности задаются $\mathcal{P}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}, \gamma_1, \gamma_2)$, где $\gamma_1 \geq 0$ и $\gamma_2 \geq \gamma_1$, и $\gamma_1 = \frac{b}{1-a-b}, \gamma_2 = \frac{1+b}{1-a-b}$.

– α_{it} : $\alpha_{it} \geq \text{Prob}(\psi_{it} < I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is})$, т. е. Максимальная вероятность ψ_{it} того, что переменная меньше уровня запасов клиента $i \in N \setminus \{0\}$ в периоде $t \in T$, и $\alpha_{it} = \frac{\alpha}{n \cdot |T|}$.

– $\boldsymbol{\delta}_{it}$: Вектор $[1, \dots, 1, 0, \dots, 0]^T, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, где первые t элементов в этом векторе равны 1.

– $\boldsymbol{\pi}_{it}$: вектор $[-1, \dots, -1, 0, \dots, 0]^T, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, где первые t элементов -1 .

Новые переменные решения:

– β : Непрерывная переменная, обозначающая максимальную вероятность существующего дефицита или переполнения склада клиента.

– $\epsilon_{it}^1, \epsilon_{it}^2$: Непрерывная переменная, обозначающая вероятность индивидуального риска для существующего запаса и переполняющая склад клиента $i \in N \setminus \{0\}$ в течение периода $t \in T$ соответственно. Он рассчитывается как $\epsilon_{it}^1 = \epsilon_{it}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta}{n \cdot |T|}$.

– ψ_{it} : Непрерывная переменная для линеаризации $\max\{I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, 0\}$, которая неотрицательна.

[Р6]:

$$\begin{aligned} & \min \beta \\ \text{s. t. } & (2) - (6), (8) - (11), (29), (30), (32), (33) \\ & \sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1 \cdot b}{1-\epsilon_{it}^1}} \right) \sqrt{\boldsymbol{\delta}_{it}^T \boldsymbol{\Sigma}_i \boldsymbol{\delta}_{it}} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \leq \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1}{1-\epsilon_{it}^1}} (I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\delta}_{it}), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \\ & \sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1 \cdot b}{1-\epsilon_{it}^1}} \right) \sqrt{\boldsymbol{\delta}_{it}^T \boldsymbol{\Sigma}_i \boldsymbol{\delta}_{it}} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} & \leq \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1}{1-\epsilon_{it}^1}} (I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\delta}_{it}), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \\ & \sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\alpha_{it} \cdot b}{1-\alpha_{it}}} \right) \sqrt{\boldsymbol{\pi}_{it}^T \boldsymbol{\Sigma}_i \boldsymbol{\pi}_{it}} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\leq \sqrt{\frac{\alpha_{it}}{1-\alpha_{it}}} (\psi_{it} - I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} - \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\pi}_{it}), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$$

$$\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \quad (38)$$

На основе [Р6] двухэтапный иерархический подход, названный иерархическим подходом на основе МПР, получил дальнейшее развитие и показан в Алгоритме 1. Иерархический подход на основе МПР основан на правиле проб и ошибок: нахождение минимального β такого что [Р6] выполнимо во время итераций и получения соответствующего выполнимого решения. Поскольку [Р6] является консервативным приближением, для удовлетворения ограничения (32) требуется бюджет с большим значением B' . Бюджет входного капитала устанавливается как произведение его первоначальной стоимости и множителя $\theta_0 \geq 1$, то есть $B' = B \cdot \theta_0$ для поиска возможных решений. Если при текущем не найдено ни одного возможного решения θ_0 , значение θ_0 будет обновлено как $\theta_0 = \theta_0 + \Delta$, где Δ - размер шага θ_0 . В начале метода дана оценка вероятностей риска ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 . MAXITER подразумевает максимальное количество итераций. U и O обозначают два набора, которые хранят значения ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 в каждой итерации соответственно. U^* и O^* обозначают два набора, которые хранят значения ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 , при которых [Р6] выполнимо.

Алгоритм 1 MIP-иерархический подход

Input: Parameters for the problem:
 $n, |T|, |H|, C, B, c_h^a, c_{ij}, c_{i0}^b, f_t, c_{it}^{inv}, \mu_i, \Sigma_i, \forall i, j \in N, t \in T, h \in H.$

- 1 $k = 1$; (Iteration counter)
- 2 $\epsilon_{it}^{1,k} = \frac{0.618}{n \cdot |T|}, \epsilon_{it}^{2,k} = \frac{0.618}{n \cdot |T|}, \forall i \in N, t \in T;$
- 3 $U = \emptyset, O = \emptyset;$ (Set of the values of ϵ_{it}^1 and ϵ_{it}^2)
- 4 $U^* = \emptyset, O^* = \emptyset;$ (Set of the values of ϵ_{it}^1 and ϵ_{it}^2 so that [P6] is feasible)
- 5 **while** θ_0 **do**
- 6 **for** $k = 1 : MAXITER$ **do**
- 7 Solve formulation [P6] by calling CPLEX;
- 8 $U = U \cup \epsilon_{it}^1$ and $O = O \cup \epsilon_{it}^2;$
- 9 **if** *The problem is feasible* **then**
- 10 $U^* = U^* \cup \epsilon_{it}^1$ and $O^* = O^* \cup \epsilon_{it}^2;$
- 11 $\epsilon_{it}^{1,k+1} = \epsilon_{it}^{1,k} - 0.618 \cdot \left(\epsilon_{it}^{1,k} - \max_{u \in \{1, \dots, |U|\}} \{U(u) | U(u) < \epsilon_{it}^{1,k}\} \right)$
and
 $\epsilon_{it}^{2,k+1} = \epsilon_{it}^{2,k} - 0.618 \cdot \left(\epsilon_{it}^{2,k} - \max_{o \in \{1, \dots, |O|\}} \{O(o) | O(o) < \epsilon_{it}^{2,k}\} \right);$
- 12 **else**
- 13 $\epsilon_{it}^{1,k+1} =$
 $\epsilon_{it}^{1,k} + 0.618 \cdot \left(\min_{u \in \{1, \dots, |U|\}} \{U(u) | U(u) > \epsilon_{it}^{1,k}\} - \epsilon_{it}^{1,k} \right),$
- 14 $\epsilon_{it}^{2,k+1} =$
 $\epsilon_{it}^{2,k} + 0.618 \cdot \left(\min_{o \in \{1, \dots, |O|\}} \{O(o) | O(o) > \epsilon_{it}^{2,k}\} - \epsilon_{it}^{2,k} \right);$
- 15 **end**
- 16 **end**
- 17 **end**
- 18 $\theta = \theta + \Delta;$
- 19 **end**
- 20 Compare the values in Sets U^* and O^* and obtain the minimum objective $\beta.$

Output: A service level $(1 - \beta)$ and the corresponding solution.

Как показано в алгоритме 1, во время k -й итерации: (i) [P6] решается, и его выполнимость проверяется путем вызова CPLEX; (ii) Уровни риска $\epsilon_{it}^{1,k}$ и $\epsilon_{it}^{2,k}$ обновляются с помощью методов пошагового поиска, таких как поиск по разделению пополам и поиск по золотому сечению. Поскольку метод поиска золотого сечения широко используется и хорошо работает (Nazareth and Tseng, 2002, Mourad and Reilly, 2010, Chen et al., 2015), он применяется в данном

исследовании. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки. Затем, сравнивая значения уровней риска в U^* и O^* , можно получить минимальные значения ϵ_{it}^1 и ϵ_{it}^2 , и соответствующие объективные значения и решения.

Выводы по главе

В данной главе проведено исследование нового стохастического IRP с частичной распределительной информацией о потребностях клиентов, ограниченным бюджетом и выбором модулей обработки. Для решения проблемы предложена новая формулировка с ограничением вероятности, в которой целевая функция является вероятностной, а риск превышения системой бюджета контролируется случайным ограничением. На основе двух методологий аппроксимации для частичного известного распределения вероятностей предложены метод выборочного среднего приближения (SAA) и иерархический подход, соответственно.

ГЛАВА 3 ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Вычислительные эксперименты

В этом разделе предложенные подходы решения оцениваются в случайно сгенерированных случаях. Подходы кодируются в MATLAB_2014b и объединяются решателем CPLEX 12.6. Все численные эксперименты проводятся на персональном компьютере с процессором Intel Xeon x3440 3,8 ГГц и 12 ГБ ОЗУ на операционной системе Windows 10. Время вычислений методов ограничено 3600 с. Каждый экземпляр проверяется 10 раз каждым подходом, чтобы получить его среднее значение.

3.2. Тест вне образца

Тестируем решения, полученные двумя методами, в большом наборе сценариев, а именно в тесте вне выборки (Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2017, Zhang et al., 2018). В сценариях требования клиентов генерируются после логарифмического распределения и удовлетворяют заданной информации, представляющей реализацию требований клиентов (Xie and Ahmed, 2018). Чтобы определить количество сценариев, протестированно 1000, 5000, 10000 сценариев (Bertsimas et al., 2017, Zhang et al., 2017). Эксперименты показывают, что три числа сценариев дают очень похожие результаты, но 5000 и 10000 сценариев чрезвычайно трудоемки. Кроме того, Xie and Ahmed (2018) используют 1000 сценариев для оценки своих методов. Таким образом, проверяем решения, полученные двумя методами в 1000 сценариях. Поскольку выбор модуля обработки рассматривается как решение тактического уровня, его следует определить до реализации требований клиента. То есть для каждого метода на основе полученного им выбора модуля обработки:

В каждом из 1000 сценариев решение о маршруте транспортного средства и объемы складских запасов клиента в каждом периоде определяются путем решения [P3] посредством вызова CPLEX.

Затем эффективность каждого метода вне выборки оценивается по следующим показателям:

1. уровень обслуживания по следующей формуле: $\frac{s_1}{1000} \times 100\%$, где s_1 обозначает количество сценариев без дефицита и переполнения складов клиентов;

2. уровень риска, рассчитываемый по: $\frac{s_2}{1000} \times 100\%$, где s_2 - количество сценариев, при которых общая стоимость системы превышает бюджет;

3. уровень покрытия, полученный с помощью $\frac{times}{1000 \times n \times |T|} \times 100\%$, где $1000 \times n \times |T|$ обозначает общую частоту запросов клиентов, а время - это количество раз, когда не было выбытия и переполнения складов клиентов.

3.3. Наглядный пример

Предварительный анализ проводится для корректировки параметров, предложенных двух методов решения, чтобы каждый метод мог получать решения с высоким качеством при выбранных параметрах, чтобы сделать их сопоставимыми. Параметры для предложенных двух методов решения показаны в таблице 1. Далее для $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и $|\Omega|$ в SAA установлены значения 6, 6, 1 и 20, а для $\gamma_1, \gamma_2, \Delta$ иерархического подхода на основе MIP установлены значения 0,2 и 0,4.

Таблица 1. Входные параметры для методов решения.

SAA				MIP-иерархический подход				
Параметры	θ_1	θ_2	θ_3	$ \Omega $	γ_1	γ_2	Δ	<i>MAXITER</i>
Значение	6	6	1	20	0.2	0.4	0.2	10

Наглядный пример, основанный на небольшой сети, изучается для сравнения предложенных двух методов решения с точным методом путем вызова CPLEX, что будет подробно описано позже. Параметры примера представлены в Таблице 2, где всего 3 клиента и 2 периода времени. Предполагается, что требования потребителей независимы, а распределение вероятностей дискретно (Таблица 3). Общее количество возможных сценариев: $4^6 = 4096$, где 4 обозначает количество вероятностей в Таблице 3, а в Таблице 6 - количество запросов 3 клиентов в течение 2 периодов. Согласно Таблице 3, данное среднее значение и стандартное отклонение спроса каждого клиента могут быть рассчитаны как 3,8 и 3,77.

Таблица 2. Входные параметры для небольшой сети.

Параметры	Значение
Количество клиентов (n)	3
Количество периодов времени ($ T $)	2
Вместимость автомобиля (C)	6
Фиксированная стоимость автомобиля (ft)	[5,10]
Стоимость запасов ($citinv$)	5
Уровень запасов в начале ($Ii0$)	0
Координаты	(1,5),(1,4),(5,5)
Складские мощности (Wh)	[4,6,8]
Стоимость обработки (cha)	[100,200,300]
Бюджет (B)	1000

Таблица 3. Распределение вероятностей требований клиентов.

Требования	2	4	6	8
Вероятность	0.4	0.4	0.1	0.1

В таблице 4 представлен выбор модуля обработки, полученный точным методом, SAA и основанным на МIP иерархическим подходом. Обратите внимание, что точный метод основан на перечислении всех 4096 сценариев, в которых CPLEX вызывается для непосредственного решения [P3]. В каждой строке $i \in \{1,2,3\}$, если есть число «1», это означает, что модуль обработки склада клиента $h \in H$, то есть $z_{ih} = 1$. Время вычислений точного метода, SAA и основанного на МIP иерархического подхода составляет 312,6, 15,2 и 13,8 с соответственно. Из таблицы 4 видно, что уровень обслуживания, уровень риска и уровень покрытия одинаковы по трем методам, но время расчета SAA и иерархического подхода на основе МIP составляет всего 4,86% и 4,41% от точного метода. вызывая CPLEX соответственно. Результаты для протестированного экземпляра показывают, что SAA и основанный на МIP иерархический подход хорошо работают для экземпляра небольшого размера.

Таблица 4. Экспериментальные результаты небольшой сети.

		Точный метод			SAA			MIP-иерархический подход		
Модули обработки клиентов	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1			1			1			
2	1			1			1			
3	1			1			1			
Время (s)		312.6			15.2			13.8		
Уровень обслуживания (%)		100			100			100		
Уровень риска (%)		0			0			0		
Уровень покрытия (%)		100			100			100		

Однако на практике, поскольку распределение вероятностей требований является более сложным и возможные сценарии не могут быть перечислены, точный метод не подходит для крупномасштабных случаев. Поэтому в дальнейшем применяем иерархический подход SAA и МIP для тестирования экземпляров больших размеров.

3.4. Численные эксперименты на случайно сгенерированных экземплярах

Проведены численные эксперименты на случайно сгенерированных экземплярах с различными масштабами. Проверенные данные подробно описаны в таблице 5. Параметры $C, f_t, c_{it}^{inv}, I_{i0}$ генерируются случайным образом и равномерно, как в соответствии с Yu et al. (2012) из интервалов $[100,400], [400,700], [0.5,2], [50,400]$, и $|T| = 5$. SAA основан на приближении конечной выборки Ω через набор сценариев со случайно сгенерированным спросом. Способ (т. Е. Выбранное эмпирическое распределение) случайным образом генерировать требования может повлиять на производительность SAA. Поэтому используются два общих распределения: равномерное распределение и нормальное распределение. Поскольку корреляция требований клиентов зависит от конкретных условий применения, необходимо предварительно обработать ограниченные исторические данные. Кроме того, корреляция может быть положительной или отрицательной. Чтобы проиллюстрировать предложенные подходы, рассматриваем нейтральную корреляцию, то есть, требования клиентов в разные периоды времени предполагаются как независимо распределенные (Chen et al., 2010). Результаты вычислений представлены в таблице 6, где «-» означает, что в течение 3600 с не может быть найдено ни одного возможного решения.

Таблица 5. Входные данные протестированных экземпляров.

Параметры	Связанные с предыдущей работой	Случайно сгенерированный	Значение
Средний спрос (μ_{it})	✓		$[100,400]$
Стандартное отклонение спроса (σ_{it})	✓		$0.2\mu_{it}$
Вместимость автомобиля (C)	✓		$[100,400]$
Фиксированная стоимость автомобиля (f_t)	✓		$[400,700]$
Стоимость запасов (c_{it}^{inv})	✓		$[0.5,2]$
Уровень запасов в начале (I_{i0})	✓		$[50,400]$
Стоимость доставки (c_{ij})	✓		Геометрическое расстояние 10×10
Стоимость проезда пустого автомобиля (c_{i0}^b)	✓		$10 \times c_{i0}$
Складские мощности (Wh)		✓	$[200,300,400,500]$
Стоимость обработки (c_{it}^a)		✓	$[400,600,800,1000]$
Бюджет (B)		✓	$11.5 \times 10^3 \times n$

Таблица 6. Влияние размера экземпляра и способ формирования требований клиентов к SAA.

№	n	SAA с требованиями, сформированными из нормального распределения				SAA с требованиями, сформированными из равномерного распределения				МIP-иерархический подход			
		Уровень обслуживания (%)	Уровень риска (%)	Уровень покрытия (%)	Время (s)	Уровень обслуживания (%)	Уровень риска (%)	Уровень покрытия (%)	Время (s)	Уровень обслуживания (%)	Уровень риска (%)	Уровень покрытия (%)	Время (s)
1	5	50.12	0.00	96.83	22.3	50.31	0.00	96.86	34.6	50.33	0.00	96.98	4.5
2	7	100.00	0.00	100.00	41.2	100.00	0.00	100.00	52.3	100.00	0.00	100.00	7.8
3	9	90.01	0.01	99.69	52.5	90.12	0.01	99.64	56.8	90.01	0.00	99.75	13.7
4	11	99.99	0.02	99.99	85.7	99.99	0.01	99.99	87.3	99.99	0.01	99.99	14.6
5	13	99.99	0.00	99.99	119.9	99.99	0.00	99.99	120.5	99.99	0.00	99.99	14.9
6	15	39.17	0.00	98.21	161.6	40.21	0.00	98.33	174.2	40.16	0.00	98.35	21.4
7	17	12.02	0.00	95.02	223.5	12.45	0.00	95.11	230.8	11.95	0.00	95.09	33.6
8	19	99.99	0.00	99.99	269.8	99.99	0.00	99.99	273.4	99.99	0.00	99.99	42.9
9	21	99.99	0.00	99.99	370.4	99.99	0.00	99.99	382.5	99.99	0.00	99.99	49.8
10	23	76.10	0.00	99.53	493.3	76.28	0.00	99.64	504.8	76.25	0.00	99.49	59.8
11	25	99.99	0.00	99.99	649.7	99.99	0.00	99.99	633.1	99.99	0.00	99.99	72.1
12	27	99.99	0.00	99.99	899.5	99.99	0.00	99.99	889.7	99.99	0.00	99.99	85.5
13	29	78.21	0.00	98.75	1112.9	78.33	0.00	98.98	1100.5	78.27	0.00	98.86	104.2
14	31	99.99	0.00	99.99	1424.6	99.99	0.00	99.99	1429.7	99.99	0.00	99.99	122.3
15	33	99.99	0.00	99.99	1826.1	99.99	0.00	99.99	1997.9	99.99	0.00	99.99	150.4
16	35	75.96	0.00	94.44	2530.2	75.94	0.00	94.35	2598.9	76.25	0.00	94.46	193.1
17	37	99.99	0.00	99.99	3106.5	99.99	0.00	99.99	3567.2	99.99	0.00	99.99	213.3

Продолжение таблицы 6

18	39	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	251.1
19	41	53.21	0.00	86.49	3600.0	52.16	0.00	86.97	3600.0	53.67	0.00	87.59	270.5
20	43	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	281.2
21	45	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	300.6
22	47	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	338.0
23	49	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	386.4
24	51	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	3600.0	99.99	0.00	99.99	466.7
25	53	–	–	–	–	–	–	–	–	65.49	0.00	94.98	512.3

Из столбцов 6, 10 и 14 в Таблице 6 можно получить, что время вычисления предложенных двух методов решения увеличивается с масштабом задачи. Время вычислений в столбцах 6 и 10 SAA намного больше, чем в иерархическом подходе на основе MIP. Из 25-й строки в Таблице 6 можно видеть, что SAA теряет свою способность разрешать случаи, превышающие 51 клиента. Кроме того, столбцы 4–10 в Таблице 6 показывают, что решения, полученные SAA в соответствии с требованиями нормального и равномерного распределения, очень похожи с точки зрения уровня обслуживания, уровня риска, уровня покрытия и времени вычислений. Таким образом, можно сделать вывод, что влияние разного распределения спроса на SAA довольно мало. Кроме того, решения, полученные с помощью SAA и основанного на MIP иерархического подхода, аналогичны.

Более того, из Таблицы 6 также можно узнать, что с расширением масштабов проблемы уровень обслуживания не стал хуже. Причины могут быть следующие. Как в соответствии с Yu et al. (2012), парк транспортных средств и количество поездок, которые автомобиль выполняет в каждый период, не ограничены. То есть увеличение спроса клиентов может быть удовлетворено путем использования большего количества транспортных средств или совершения большего количества поездок на транспортных средствах. Таким образом, расширение масштабов проблемы, то есть увеличение спроса, в основном приводит к увеличению затрат. Кроме того, бюджет капиталовложений в вычислительных экспериментах устанавливается равным $11.5 \times 10^3 \times n$, где n обозначает количество клиентов. То есть бюджет столицы пропорционален количеству клиентов. Поэтому бюджет столицы увеличивается с расширением масштабов проблемы.

3.5. Анализ чувствительности

В этой части проводится анализ чувствительности в случае 15 клиентов. Входные данные генерируются способом, подробно описанным в таблице 5, так что: (1) четыре модуля обработки задаются как $W_1 = 200, W_2 = 400, W_3 = 600, W_4 = 800$, и $c_1^a = 400, c_2^a = 600, c_3^a = 800, c_4^a = 1000$; (2) координаты клиентов и центрального депо сначала генерируются из квадрата 10×10 , а затем c_{ij} рассчитываются как геометрическое расстояние между клиентами i и j , и $c_{i0}^b = 10 \times c_{i0}$; (3) I_{i0}, μ_{it} показаны в Таблице 7. Далее, если не указано иное, (i) фиксированные затраты на транспортные средства в $|T| = 5$ периодах: $f_1 = 615, f_2 = 456, f_3 = 650, f_4 = 424, f_5 = 480$ (ii) вместимость транспортного средства установлена на 300, (iii) установлен капитальный бюджет как $11.5 \times 10^3 \times n$, где $n = 15$ и (iv) стандартное отклонение устанавливается как $\sigma_{it} = 0.2 \times \mu_{it}$. Для основанного на МП иерархического подхода ограниченный уровень риска для превышения бюджета капитала устанавливается как $\alpha = 0.5$, а максимальное количество итераций равно 10.

Таблица 7. Входные данные.

Покупатели (i)	I_{i0}	μ_{it}					c_{it}^{inv}				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	59	345	171	366	382	155	1,37	1,61	1,32	1,15	0,85
2	52	334	139	171	249	283	0,50	0,76	0,84	1,58	1,60
3	64	297	319	145	238	215	0,55	0,58	0,76	1,45	0,96
4	85	316	184	191	116	345	1,32	1,16	1,59	0,75	1,34
5	57	387	259	194	376	162	1,78	0,84	0,59	1,94	1,06
6	51	116	142	380	236	133	1,19	1,07	1,44	0,79	1,65
7	90	258	216	293	247	131	1,91	0,69	1,05	0,84	1,19
8	77	179	230	318	400	325	1,45	1,11	1,70	1,92	1,51
9	55	378	288	128	323	343	1,60	1,95	0,61	1,64	1,72
10	75	294	331	301	109	280	1,44	0,76	0,87	0,78	0,79
11	70	284	188	214	204	289	1,70	0,72	0,67	0,64	1,25
12	88	365	317	229	259	218	0,75	1,69	1,93	1,00	1,26
13	89	241	164	206	136	332	0,76	1,45	1,99	0,76	1,41
14	91	174	384	104	171	112	1,42	1,41	1,09	1,81	1,32
15	96	228	143	183	307	172	0,51	0,69	1,44	0,86	1,46

Влияние стоимости бюджета сначала рассматривается, и бюджет устанавливается из $9 \times 10^3 \times n, 9.5 \times 10^3 \times n, \dots, 12 \times 10^3 \times n$. Численные результаты представлены в Таблице 8 и на рисунке 16. Можно получить, что уровень обслуживания, уровень риска и уровень покрытия, полученные SAA и основанный на МП иерархический подход, очень похожи. Однако из столбцов 5 и 9 в Таблице 8 можно заметить, что время вычислений SAA примерно в 7 раз больше, чем в иерархическом подходе на основе МП. Поскольку основанный на МП иерархический подход имеет относительно небольшое преимущество, на рис. 16 показана только производительность этого метода. Уровень обслуживания и уровень покрытия увеличиваются с бюджетом капиталовложений. Это может быть связано с тем, что модуль обработки с большей складской емкостью и большим количеством

транспортных средств может быть выбран с большим капитальным бюджетом. Более того, поскольку уровень риска измеряется вероятностью превышения бюджета капитала, таким образом, понимается, что уровень риска уменьшается, когда бюджет капитала увеличивается, как показанно на рисунке 16.

Таблица 8. Влияние бюджета капитала В.

$B (\times 10^3) \times n$	SAA				МIP-иерархический подход			
	Уровень обслуживания (%)	Уровень риска (%)	Уровень покрытия (%)	Время (s)	Уровень обслуживания (%)	Уровень риска (%)	Уровень покрытия (%)	Время (s)
9.0	0.00	100.00	89.58	160.1	0.00	100.00	89.84	21.4
9.5	0.00	100.00	89.54	159.8	0.00	100.00	89.54	21.2
10.0	0.00	100.00	89.59	153.2	0.00	100.00	89.58	20.9
10.5	0.00	65.00	91.13	155.2	0.00	65.10	91.14	20.8
11.0	1.00	25.00	94.72	157.8	1.02	25.01	94.73	22.4
11.5	40.00	2.00	98.21	152.3	40.21	2.01	98.21	21.7
12.0	92.00	0.00	99.83	156.4	92.31	0.00	99.84	22.7

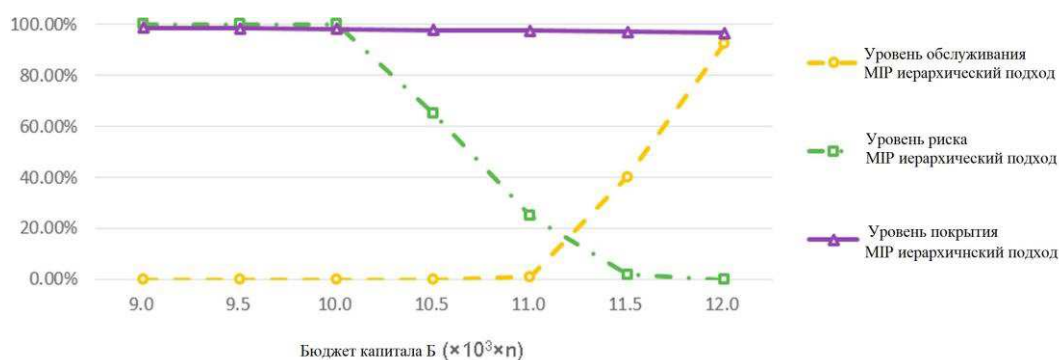


Рисунок 16 – влияние основного бюджета

Затем исследуется чувствительность решений со стандартным отклонением, то есть, и стандартное отклонение устанавливается из $0, 0.1 \times \mu_{it}, \dots, 1 \times \mu_{it}$. Кроме того, поскольку стандартное отклонение σ_{it} установлено как связанное со средним потребительским спросом μ_{it} , мы также проверяем, влияют ли на результаты настройки параметров, и каждое среднее потребительское требование μ_{it} генерируется случайным образом и равномерно из интервалов $[100, 200]$, $[100, 300]$, $[100, 400]$ и $[100, 500]$. Численные результаты представлены на рис. 17, из которого мы можем наблюдать, что изменяющиеся тенденции уровня обслуживания, уровня покрытия и уровня риска различны при разных μ_{it} . Когда μ_{it} мало, то есть

$\mu_{it} \in [100,200]$, качество решения очень высокое при всех тестах σ_{it} , так что уровень покрытия и уровень обслуживания очень близки к 1, а уровень риска близок к 0. С увеличением σ_{it} , увеличивается количество клиентов с высокими требованиями, поэтому уровень обслуживания снижается. Кроме того, при $\mu_{it} \in [100,400]$ мы наблюдаем, что с увеличением σ_{it} уровень обслуживания сначала увеличивается, затем слегка колеблется и, наконец, уменьшается. Причиной может быть то, что, когда σ_{it} начинает увеличиваться с 0, потребности клиентов относительно фиксированы в данном интервале $[100,400]$, и есть более меньшие требования, и, таким образом, могут быть удовлетворены более высокие требования при данных мощностях транспортных средств и складов. Однако по мере того, как σ_{it} продолжает увеличиваться, одновременно увеличивается количество небольших и больших запросов, поэтому уровень обслуживания слегка колеблется. Когда σ_{it} становится больше, может существовать ситуация, когда спрос слишком велик для удовлетворения, поэтому уровень обслуживания снижается. Кроме того, уровень риска увеличивается с увеличением σ_{it} . Причина может заключаться в том, что при увеличении σ_{it} будет выбран модуль обработки с большей емкостью модуля и более высокими затратами на обработку, чтобы сбалансировать колебания спроса, что приведет к увеличению затрат. Более того, когда $\mu_{it} \in [100,500]$ больше, μ_{it} больше, что приводит к более высоким требованиям клиентов, и, следовательно, качество решения довольно низкое во всех протестированных σ_{it} .

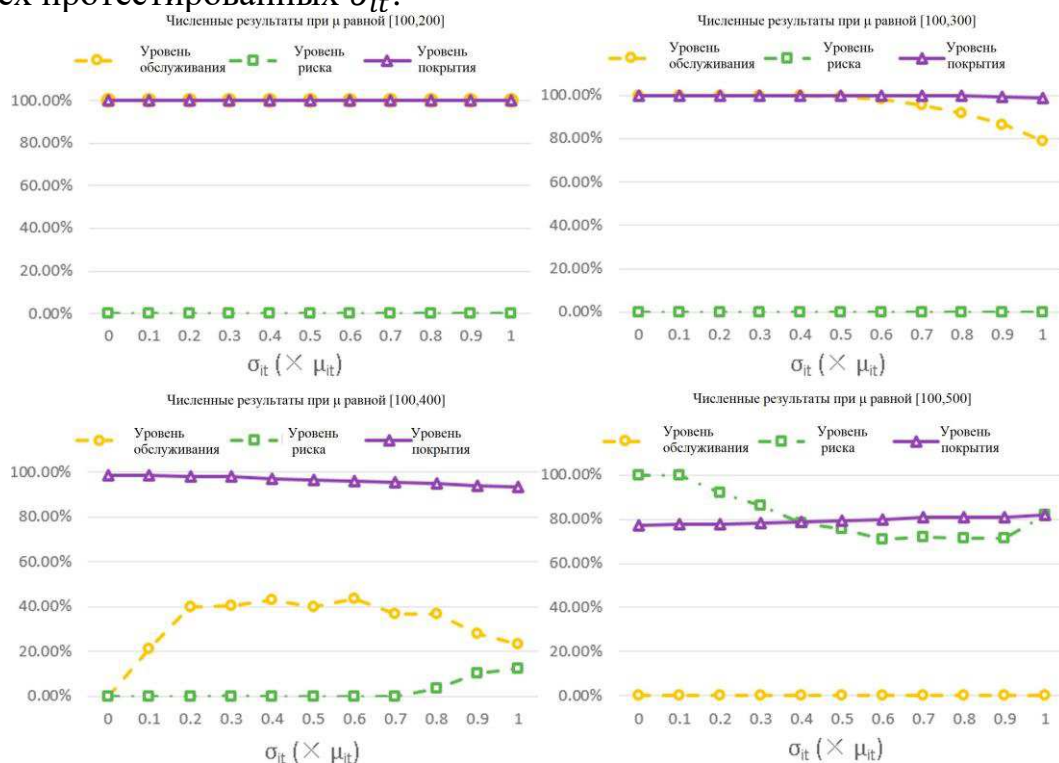


Рисунок 17 - Влияние стандартного отклонения под различными средними требованиями.

Влияние грузоподъемности транспортного средства дополнительно рассматривается, и грузоподъемность устанавливается на уровне 100, 150, ...,

400. Результаты расчетов иерархического подхода на основе МПР показаны на рис. 18. Можно получить, что уровень обслуживания и охват повышается с уровнем вместимости транспортного средства. Причина может заключаться в том, что, когда вместимость транспортного средства увеличивается, одно транспортное средство может удовлетворить больше требований. Кроме того, уровень риска снижается с увеличением вместимости автомобиля. Это может быть связано с тем, что большая вместимость транспортного средства требует меньше транспортных средств для удовлетворения потребностей клиентов, что приводит к снижению стоимости системы.

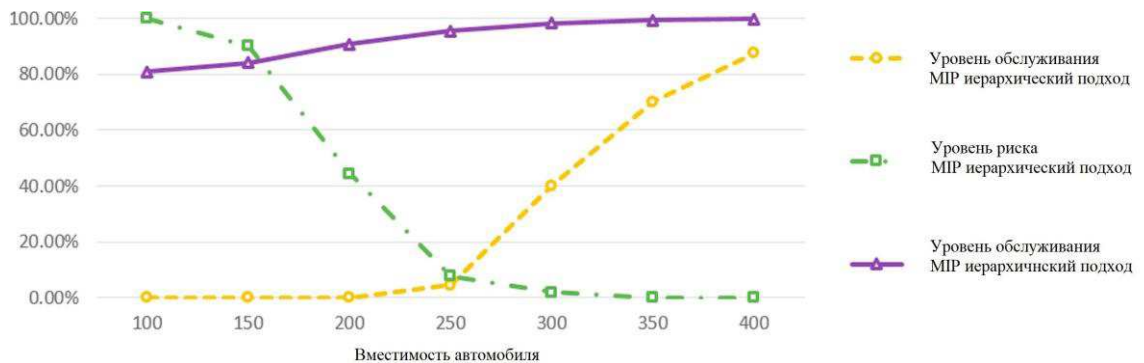


Рисунок 18 - Влияние вместимости автомобиля.

Влияние уровня запасов каждого клиента в начале проверяется, и входное или начальное значение уровня запасов устанавливается в $I_0 - 50, I_0 - 40, \dots, I_0 + 50$. Численные результаты иерархического подхода, основанного на МПР, показаны на рис. 19. Может быть получено, что уровень обслуживания и уровень покрытия увеличиваются с уровнем входных запасов. Причина может заключаться в том, что при увеличении исходного уровня запасов в начале, одинаковое количество поездок на транспортных средствах может удовлетворить больше потребностей. Кроме того, влияние уровня входных запасов на уровень риска незначительно.

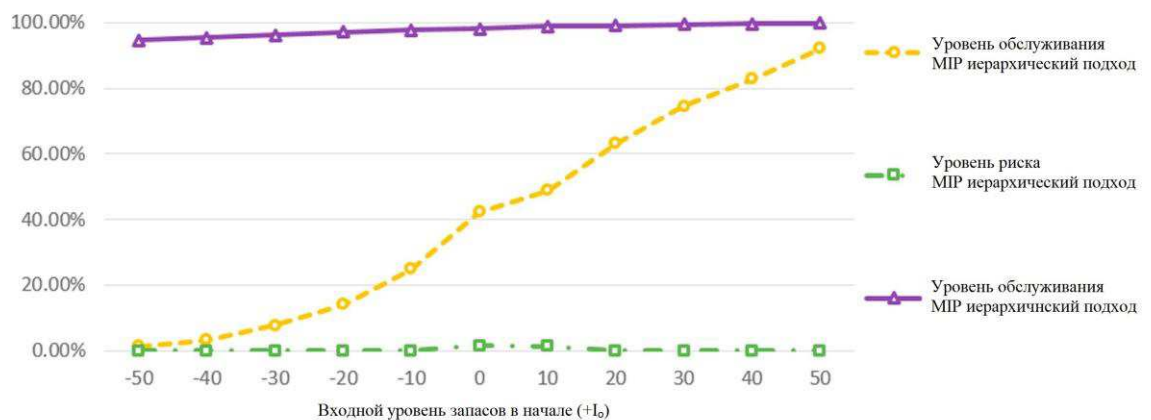


Рисунок 19 - Влияние уровня запасов в начале.

В итоге можно получить, что (i) решения, полученные с помощью SAA и основанного на МПР иерархического подхода, схожи с точки зрения уровня

обслуживания, уровня риска и уровня покрытия; (ii) время вычисления SAA намного больше, чем время иерархического подхода на основе MIP; (iii) с увеличением капитального бюджета уровни обслуживания и покрытия увеличиваются, а уровень риска снижается; (iv) когда стандартные отклонения требований клиентов возрастают, уровень риска увеличивается; (v) при заданном параметре настройки среднего потребительского спроса с увеличением стандартного отклонения каждого потребительского спроса сначала уровень обслуживания и покрытия увеличиваются, а затем незначительно снижаются; (vi) с увеличением вместимости транспортного средства уровень обслуживания и уровень покрытия увеличиваются, а уровень риска снижается; (vii) с повышением уровня входных запасов каждого клиента вначале уровни обслуживания и покрытия увеличиваются, и уровень риска не изменяется очень сильно; (viii) рекомендуется иерархический подход на основе MIP в качестве метода решения из-за его эффективности.

С учетом вышесказанного можно сделать следующие предложения:

(1) Компромиссы между капитальным бюджетом, уровнем запасов в начале и уровнем обслуживания чрезвычайно важны для поддержки процесса планирования для лиц, принимающих решения. Более высокий уровень запасов в начале приводит к более высокому уровню обслуживания, в то же время это также приводит к увеличению стоимости владения, поэтому необходимо увеличение капитального бюджета.

(2) Когда средние требования клиентов довольно малы, нет необходимости увеличивать бюджет, даже если стандартные отклонения становятся больше. Однако, когда средние требования клиентов очень велики, необходимо увеличение бюджета, независимо от стандартных отклонений. В других ситуациях стандартное отклонение является существенным фактором, влияющим на решения.

(3) Пропускная способность транспортных средств в значительной степени влияет на уровень обслуживания, уровень покрытия и уровень риска, то есть при большой вместимости транспортного средства одно и то же количество поездок по доставке может удовлетворить больше потребностей клиентов, что приводит к высокому уровню покрытия и уровню обслуживания. Таким образом, автопарк должен быть нанят разумно.

Выводы по главе

В этой части рассматривается стохастическая IRP с различными альтернативными модулями обработки и ограниченным капитальным бюджетом, чтобы максимизировать уровень обслуживания. Предполагается, что требования клиентов являются стохастическими, и известны только частичные знания о распределении вероятностей, то есть о среднем и ковариационной матрице. Предложена новая распределенная надежная формулировка случайного ограничения, в которой целевая функция является

вероятностной, а общая стоимость системы контролируется случайным ограничением. Поскольку формулировка не может быть непосредственно и оптимально решена при частичной информации о распределении, предлагается эквивалентная модель преобразования и применяются методы аппроксимации. На основе двух методов приближения разработан SAA и основанный на MIP иерархический подход, основанный на характеристиках задачи. Численные эксперименты проводятся для оценки применимости и производительности двух методов.

ГЛАВА 4 ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Создание сети оптовых складов с доставкой.

Данная методика может быть использована для построения сети складов и транспортных сетей. Также метод может быть использован для оптимизации работы уже действующей складской сети. Данный расчет позволяет максимизировать уровень удовлетворенности клиентов учитывая запросы, в том числе внезапные.

Идея состоит в том, чтобы максимально повысить уровень обслуживания, контролируя вероятность или риск того, что общая стоимость системы превысит бюджет

Подразумевается, что склад обладает различным оборудованием и рабочими. Правильный выбор комбинации оборудования и рабочих может значительно улучшить производительность системы.

Центральный склад рассматривается как центральный продавец или производитель, мощность которого предполагается неограниченной. Центральный склад отвечает за доставку товаров клиентам через парк однородных транспортных средств с заданной вместимостью.

У каждого клиента есть свой склад. Другими словами, каждый покупатель оборудован специальным складом, который находится по месту нахождения соответствующего покупателя. Склад каждого клиента обладает различным оборудованием и рабочими. Различные комбинации этих ресурсов рассматриваются как модули обработки с соответствующими складскими мощностями и затратами на обработку.

Для расчета используется два метода MIP и SAA. Затем эффективность каждого метода вне выборки оценивается по следующим показателям:

1. Уровень обслуживания по следующей формуле: $\frac{s_1}{1000} \times 100\%$, где s_1 обозначает количество сценариев без дефицита и переполнения складов клиентов;

2. Уровень риска, рассчитываемый по: $\frac{s_2}{1000} \times 100\%$, где s_2 - количество сценариев, при которых общая стоимость системы превышает бюджет;

3. Уровень покрытия, полученный с помощью $\frac{times}{1000 \times n \times |T|} \times 100\%$, где $1000 \times n \times |T|$ обозначает общую частоту запросов клиентов, а время - это количество раз, когда не было выбытия и переполнения складов клиентов.

В итоге можно получить, что (i) решения, полученные с помощью SAA и основанного на MIP иерархического подхода, схожи с точки зрения уровня обслуживания, уровня риска и уровня покрытия; (ii) время вычисления SAA намного больше, чем время иерархического подхода на основе MIP; (iii) с увеличением капитального бюджета уровни обслуживания и покрытия увеличиваются, а уровень риска снижается; (iv) когда стандартные отклонения требований клиентов возрастают, уровень риска увеличивается; (v) при заданном параметре настройки среднего потребительского спроса с

увеличением стандартного отклонения каждого потребительского спроса сначала уровень обслуживания и покрытия увеличиваются, а затем незначительно снижаются; (vi) с увеличением вместимости транспортного средства уровень обслуживания и уровень покрытия увеличиваются, а уровень риска снижается; (vii) с повышением уровня входных запасов каждого клиента вначале уровни обслуживания и покрытия увеличиваются, и уровень риска не изменяется очень сильно; (viii) рекомендуется иерархический подход на основе MIP в качестве метода решения из-за его эффективности.

С учетом вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Компромиссы между бюджетом, уровнем запасов в начале и уровнем обслуживания чрезвычайно важны для поддержки процесса планирования для лиц, принимающих решения. Более высокий уровень запасов в начале приводит к более высокому уровню обслуживания, в то же время это также приводит к увеличению стоимости владения, поэтому необходимо увеличение бюджета.

2. Когда средние требования клиентов довольно малы, нет необходимости увеличивать бюджет, даже если стандартные отклонения становятся больше. Однако, когда средние требования клиентов очень велики, необходимо увеличение бюджета, независимо от стандартных отклонений. В других ситуациях стандартное отклонение является существенным фактором, влияющим на решения.

3. Пропускная способность транспортных средств в значительной степени влияет на уровень обслуживания, уровень покрытия и уровень риска, то есть при большой вместимости транспортного средства одно и то же количество поездок по доставке может удовлетворить больше потребностей клиентов, что приводит к высокому уровню покрытия и уровню обслуживания. Таким образом, автопарк должен быть нанят разумно.

4. Системный бюджет предопределен, и вероятность или риск для общей стоимости системы, превышающей бюджет капитала, должны контролироваться.

Делая вывод из проделанной работы, для организации сети складов с доставкой товаров клиентам (в т.ч. на другой склад), необходимо:

1. Собрать информацию о (в т.ч. внезапных) потребностях клиентов в товарах.

2. Учесть территорию, которую будет покрывать доставка.

3. Рассчитать необходимое количество автотранспортных средств, необходимых для доставки. Также стоит учитывать вместительность т/с и грузоподъемность. В случае, если у т/с большая вместимость груза, то общее количество транспортных средств может быть уменьшено.

4. Построить оптимальные маршруты для доставки груза в ту или иную точку с наименьшими затратами.

Для расчетов используется MATLAB и решатель CPLEX. Формулы применяются из главы 2.

4.2 Подготовка и переподготовка специалистов

Для того, чтобы исследование можно было широко применять для управления складом и расчетов рисков, маршрутов и т.д., необходимо обучить или переподготовить персонал (логистов), который будет заниматься, непосредственно, сбором информации, расчетами, а также выбором оптимальной модели работы.

Основная задача логиста — изыскивать оптимальные варианты принятия решений по управлению материальными потоками, а также связанными с ними информацией и финансами. Стратегическое видение логистики заключается в поддержке выполнения корпоративной стратегии с оптимальными затратами ресурсов при управлении материальными и сопутствующими потоками.

Практика западного бизнеса доказывает, что область профессиональной деятельности современного логиста — это уже не только хорошо знакомые всем виды операционной деятельности, такие, например, как перевозка, оформление товарно-транспортных документов, комплектация заказа, хранение товаров на складе, погрузка-разгрузка транспортных средств, таможенная «очистка» грузов и т.п. Сегодня логисты разного уровня иерархии управления передовых компаний (топ-менеджеры, координаторы логистического процесса в закупках, дистрибуции и производстве, аналитики и функциональные логисты) занимаются проблемами, связанными с выбором и обоснованием корпоративной стратегии логистики, применением современных логистических концепций и технологий, разработкой оптимальных управленческих решений в функциональных областях логистики фирмы, выбором информационных систем и программных продуктов, поддерживающих логистику, моделированием и оптимизацией логистических бизнес-процессов и другими важными вопросами создания эффективной логистической системы компании.

Управление базой логистических знаний должно постоянно нацеливать высший и средний уровни персонала служб логистики компаний на то, что теоретическая подготовка современного логиста все в большей степени смещается в сторону знаний методов и моделей оптимизации в цепях поставок, принятия решений в условиях риска и неопределенности исходных данных, моделирования сложных логистических систем, использования широкого спектра прикладных SCM-программных продуктов и информационно-компьютерных технологий. Очевидно, что создание и управление базой знаний персонала компаний в области логистики и УЦП является решающим фактором повышения конкурентоспособности и успешного применения современных концепций и технологий в этих областях бизнеса. Сложившаяся экономическая ситуация диктует те условия, в которых интегрированная логистика и УЦП для российских компаний должны превратиться в стратегический ресурс, требующий высокого уровня разнообразных и глубоких знаний персонала.

Профессиональный логист должен уметь:

- Проектировать и разрабатывать логистические системы;
- Разрабатывать методы и формы ведения отчетности;
- Координировать внешние и внутренние связи фирмы;
- Анализировать эффективность и стоимость логистических операций компании;
- Согласовывать работу отдела логистики с другими отделами компании;
- Направлять и координировать финансы, которые связаны с логистическими процессами;
- Участвовать в формировании бюджета, который будет выделяться на логистику.
- Владеть ПК, знать офисные программы и 1С. Дополнительно необходимо обучить персонал владеть программой MATLAB и CPLEX для использования расчетов из исследования.

Для того, чтобы персонал хорошо справлялся с необходимыми задачами, необходимо проводить повышение квалификации.

Повышение квалификации подразделяется на три вида:

- Краткосрочное повышение квалификации;
- Проведение тематических семинаров;
- Длительное повышение квалификации.

Краткосрочное повышение квалификации. Время занятий составляет менее 72 часов. Краткосрочное повышение квалификации - это тематическое обучение по вопросам конкретного производства. Курсы повышения квалификации организуют сами работодатели, а обучение проводят высококвалифицированные работники предприятия. По завершении обучения сотрудники должны сдать соответствующий экзамен, зачет или защитить реферат.

Проведение тематических семинаров. Время занятий составляет от 72 до 100 часов. Этот вид повышения квалификации направлен на ускоренное приобретение навыков, необходимых для работы в новых условиях. В рамках подобных программ проводится изучение диссонансных и резонансных вопросов, а также современной проблематики в сферах трудовой или научной деятельности слушателей курса.

Обучение проходит в виде тренингов, проведения тематических семинаров по научно-техническим, технологическим, социально-экономическим и другим проблемам, которые возникают на уровне региона, отрасли организации, предприятия (объединения) или учреждения.

В конце курса участниками сдается зачет либо экзамен или пишется и защищается реферат по прослушанному материалу.

Если аттестационное мероприятие пройдено участником успешно, он становится обладателем персонального удостоверения, подтверждающего получение им повышения квалификации

Длительное повышение квалификации. Время занятий составляет от 100 до 500 часов. Целью длительного повышения квалификации является

углублённое изучение актуальных проблем по профилю профессиональной деятельности для обновления знаний или подготовки специалистов к выполнению новых трудовых функций. Такие программы рассчитаны на сотрудников организации, которые имеют определённый опыт работы и испытывают недостаток практических навыков и знаний.

В конце курса слушатели сдают зачет, экзамен или составляют и защищают реферат по теме материалов программы. Если аттестационные мероприятия пройдены участником курса успешно, ему предоставляется свидетельство, подтверждающее получение им повышения квалификации.

Выводы по главе

В данной главе предложены варианты использования исследования в реальной практике. Рассматривается вариант создания сети складов с собственной доставкой. Также предложен вариант подготовки или переподготовки специалистов для расчетов уровней риска, покрытия и обслуживания с помощью формул из исследования с использованием программ MATLAB и CPLEX.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проделанной работы, предприниматель, имея определенный набор данных и обученный персонал, может рассчитать оптимальную схему работы склада и доставки товара клиентам учитывая их желания, а также схему транспортировки товара между точками хранения.

Дальнейшие направления исследований могут включать: (1) разработку метаэвристики, которая может более эффективно решить проблему, (2) найти приближенный подход к более устойчивой, с точки зрения распределения, формулировке вероятности и (3) разработать алгоритмы для расчета верхней границы целевой функции, т. е. максимизация уровня обслуживания клиентов, для измерения качества подходов к решению (т. е. относительный разрыв).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Y. Adulyasak, J. Cordeau, R. Jans Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems *INFORMS J. Comput.*, 26 (1) (2014), pp. 103-120.
2. E.H. Aghezzaf, B. Raa, H.V. Landeghem Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products *Eur. J. Oper. Res.*, 169 (3) (2006), pp. 1048-1063.
3. Agra, C. Requejo, F. Rodrigues An adjustable sample average approximation algorithm for the stochastic production-inventory-routing problem, *Networks*, 72 (1) (2018), pp. 5-24.
4. J.F. Bard, N. Nananukul A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem *Comput. Oper. Res.*, 37 (12) (2010), pp. 2202-2217.
5. W.J. Bell, L.M. Dalberto, M.L. Fisher, A.J. Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R.G. Mack, P.J. Prutzman Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer *Interfaces*, 13 (6) (1983), pp. 4-23.
6. Ben-Tal, D.D. Hertog, A.D. Waegenaere, B. Melenberg, G. Rennen Robust solutions of optimization problems affected by uncertain probabilities *Manage. Sci.*, 59 (2) (2013), pp. 341-357.
7. L. Bertazzi, A. Bosco, F. Guerriero, D. Laganá A stochastic inventory routing problem with stock-out *Transport. Res. Part C*, 27 (2) (2013), pp. 89-107
8. L. Bertazzi, A. Bosco, D. Laganá Managing stochastic demand in an inventory routing problem with transportation procurement *Omega*, 56 (12) (2015), pp. 112-121.
9. L. Bertazzi, G. Paletta, M.G. Speranza Deterministic order-up-to level policies in an inventory routing problem *Transport. Sci.*, 36 (1) (2002), pp. 119-132.
10. D. Bertsimas, V. Gupta, N. Kallus Robust sample average approximation *Math. Program.*, 171 (2017), pp. 217-282.
11. M. Bijvank, I.F.A. Vis Lost-sales inventory systems with a service level criterion *Eur. J. Oper. Res.*, 220 (3) (2012), pp. 610-618.
12. J.R. Birge, F. Louveaux *Introduction to Stochastic Programming* Springer Science & Business Media, New York (2011).
13. G.C. Calafiore, L.E. Ghaoui On distributionally robust chance-constrained linear programs *J. Optim. Theory Appl.*, 130 (1) (2006), pp. 1-22.
14. A.M. Campbell, M.W.P. Savelsbergh A decomposition approach for the inventory-routing problem *Transport. Sci.*, 38 (4) (2004), pp. 488-502.
15. L.G. Chen, D.Z. Long, M. Sim On dynamic decision making to meet consumption targets *Oper. Res.*, 63 (5) (2015), pp. 1117-1130.
16. W. Chen, M. Sim, J. Sun, C.P. Teo From CVaR to uncertainty set: implications in joint chance-constrained optimization *Oper. Res.*, 58 (2) (2010), pp. 470-485.
17. J. Cheng, A. Lisser, M. Letournel Distributionally robust stochastic shortest path problem *Electron. Notes Discr. Math.*, 41 (41) (2013), pp. 511-518.

18. B.D. Chung, T. Yao, B. Zhang Dynamic traffic assignment under uncertainty: a distributional robust chance-constrained approach *Networks Spatial Econ.*, 12 (1) (2012), pp. 167-181.
19. L.C. Coelho, J.F. Cordeau, G. Laporte The inventory-routing problem with transshipment *Comput. Oper. Res.*, 39 (11) (2012), pp. 2537-2548.
20. E. Delage, Y. Ye Distributionally robust optimization under moment uncertainty with application to data-driven problems *Oper. Res.*, 58 (3) (2010), pp. 595-612.
21. L. El Ghaoui, M. Oks, F. Oustry Worst-case value-at-risk and robust portfolio optimization: a conic programming approach *Oper. Res.*, 51 (4) (2003), pp. 543-556.
22. P.M. Esfahani, D. Kuhn Data-driven distributionally robust optimization using the wasserstein metric: performance guarantees and tractable reformulations *Math. Program.*, 171 (1–2) (2018), pp. 115-166.
23. J. Hu, T. Homem-De-Mello, S. Mehrotra Sample average approximation of stochastic dominance constrained programs *Math. Program.*, 133 (1-2) (2012), pp. 171-201.
24. S.H. Huang, P.C. Lin A modified ant colony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty *Transp. Res. Part E*, 46 (5) (2010), pp. 598-611.
25. Irawan, C.A., Jones, D., 2018. Formulation and solution of a two-stage capacitated facility location problem with multilevel capacities. *Annals Oper. Res.*
26. Jebali, A. Diabat A chance-constrained operating room planning with elective and emergency cases under downstream capacity constraints *Comput. Industr. Eng.*, 114 (2017), pp. 329-344.
27. Y. Jiang, J. Shang, Y. Liu, J. May Redesigning promotion strategy for e-commerce competitiveness through pricing and recommendation *Int. J. Prod. Econ.*, 167 (2015), pp. 257-270.
28. A.J. Kleywegt, A. Shapiro, T. Homem-De-Mello The sample average approximation method for stochastic discrete optimization *Siam J. Optim.*, 12 (2) (2002), pp. 479-502.
29. J. Li, F. Chu, C. Prins, Z. Zhu Lower and upper bounds for a two-stage capacitated facility location problem with handling costs *Eur. J. Oper. Res.*, 236 (3) (2014), pp. 957-967.
30. Li, J., Ren, C., Dong, J., He, M., 2011. A lagrangean-based heuristic for a two-stage facility location problem with handling costs. In: *IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics*, pp. 319–324.
31. M. Liu, X. Liu, F. Chu, F. Zheng, C. Chu Service-oriented robust parallel machine scheduling.
32. J. Luedtke, S. Ahmed A sample approximation approach for optimization with probabilistic constraints *SIAM J. Optim.*, 19 (2) (2008), pp. 674-699.
33. S. Michel, F. Vanderbeck A column generation based tactical planning method for inventory routing *Oper. Res.*, 60 (2) (2012), pp. 382-397.
34. N. Mourad, J.P. Reilly Minimizing nonconvex functions for sparse vector reconstruction *IEEE Trans. Signal Process.*, 58 (7) (2010), pp. 3485-3496.
35. L. Nazareth, P. Tseng Gilding the lily: a variant of the Nelder-Mead algorithm based on golden-section search *Comput. Optim. Appl.*, 22 (1) (2002), pp. 133-144.

36. Nemirovski, A. Shapiro Convex approximations of chance constrained programs *SIAM J. Optim.*, 17 (4) (2006), pp. 969-996.
37. Raa, E.H. Aghezzaf A practical solution approach for the cyclic inventory routing problem *Eur. J. Oper. Res.*, 192 (2) (2009), pp. 429-441.
38. M.K.I.A. Rahim, Y. Zhong, E.H. Aghezzaf, T. Aouam Modelling and solving the multiperiod inventory-routing problem with stochastic stationary demand rates *Int. J. Prod. Res.*, 52 (14) (2014), pp. 4351-4363.
39. M. Rahimi, A. Baboli, Y. Rekik Multi-objective inventory routing problem: a stochastic model to consider profit, service level and green criteria *Transp. Res. Part E*, 101 (2017), pp. 59-83.
40. M. Savelsbergh, J.H. Song An optimization algorithm for the inventory routing problem with continuous moves *Comput. Oper. Res.*, 35 (7) (2008), pp. 2266-2282.
41. N. Shukla, M. Tiwari, D. Ceglarek Genetic-algorithms-based algorithm portfolio for inventory routing problem with stochastic demand *Int. J. Prod. Res.*, 51 (1) (2013), pp. 118-137.
42. T. Singh, J.E. Arbogast, N. Neagu An incremental approach using local-search heuristic for inventory routing problem in industrial gases *Comput. Chem. Eng.*, 80 (2015), pp. 199-210.
43. O. Solyalı, H. Süral A branch-and-cut algorithm using a strong formulation and an a priori tour-based heuristic for an inventory-routing problem *Transport. Sci.*, 45 (3) (2011), pp. 335-345.
44. O. Solyalı, H. Süral, J.F. Cordeau, G. Laporte Robust inventory routing under demand uncertainty *Transport. Sci.*, 46 (3) (2012), pp. 327-340.
45. M. Soysal, J.M. Bloemhof-Ruwaard, R. Haijema, J.G. van der Vorst Modeling an inventory routing problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty *Int. J. Prod. Econ.*, 164 (2015), pp. 118-133.
46. H. Sun, Z. Gao, W.Y. Szeto, J. Long, F. Zhao A distributionally robust joint chance constrained optimization model for the dynamic network design problem under demand uncertainty *Networks Spatial Econ.*, 14 (3-4) (2014), pp. 409-433.
47. M.R. Wagner Stochastic 0-1 linear programming under limited distributional information *Oper. Res. Lett.*, 36 (2) (2008), pp. 150-156.
48. W. Xie, S. Ahmed Distributionally robust simple integer recourse *CMS*, 15 (2018), pp. 351-367.
49. Y. Yu, H. Chen, F. Chu A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems *Eur. J. Oper. Res.*, 189 (3) (2008), pp. 1022-1040.
50. Y. Yu, C. Chu, H. Chen, F. Chu Large scale stochastic inventory routing problems with split delivery and service level constraints *Ann. Oper. Res.*, 197 (1) (2012), pp. 135-158.
51. Y. Yu, F. Chu, H. Chen A note on coordination of production and distribution planning.
52. *Eur. J. Oper. Res.*, 177 (1) (2007), pp. 626-629.
53. Y. Yu, F. Chu, H. Chen A stackelberg game and its improvement in a vmi system with a manufacturing vendor *Eur. J. Oper. Res.*, 192 (3) (2009), pp. 929-948.

54. Y. Yu, G.Q. Huang, L. Liang Stackelberg game-theoretic model for optimizing advertising, pricing and inventory policies in vendor managed inventory (vmi) production supply chains *Comput. Industr. Eng.*, 57 (1) (2009), pp. 368-382.
55. M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri, M. Mohammadi Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty *Transp. Res. Part E*, 89 (2016), pp. 182-214.
56. Y. Zhang, R. Jiang, S. Shen Ambiguous chance-constrained binary programs under mean-covariance information *SIAM J. Optim.*, 28 (4) (2018), pp. 2922-2944.
57. Y. Zhang, S. Shen, S.A. Erdogan Solving 0-1 semidefinite programs for distributionally robust allocation of surgery blocks *Optim. Lett.*, 12 (7) (2017), pp. 1503-1521.
58. S. Zymler, D. Kuhn, B. Rustem Distributionally robust joint chance constraints with second-order moment information *Math. Program.*, 137 (1-2) (2013), pp. 167-198.

Приложение А. Аппроксимация случайных ограничений общей стоимости

Из-за нелинейного выражения $\max\{I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, 0\}$, обозначенного через I_{it}^+ , ограничение (7) не может быть нормально решено. Все еще трудно решить модель [P4]. Поэтому в этой части разрабатывается консервативное приближение для ограничения (7). Для простоты изложения используется $I_{it} = (I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is})$.

Далее речь идет о любом распределении вероятностей \mathbb{P} , и поэтому \mathbb{P} опускается для простоты изложения. Во-первых, вводится новая непрерывная и неотрицательная переменная $\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$. То есть, $\text{Prob}(\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) = 1$. Для лучшего понимания, предположим, что $\text{Prob}(\psi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) = p_1$, где $p_1 \in [0,1]$.

Таким образом, мы имеем следующие отношения:

$$\begin{aligned}
 & \text{Prob}(\psi_{it} \geq I_{it}^+, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) \\
 = & \text{Prob}(\psi_{it} \geq I_{it}, \psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) \\
 = & \text{Prob}(\{\psi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N, t \in T\} \cap \{\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T\}) \\
 = & \text{Prob}(\varphi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) \\
 & - \text{Prob}(\{\varphi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T\} \cap \{\varphi_{it} < 0, \exists i \in N \setminus \{0\}, t \in T\}) \\
 = & \text{Prob}(\varphi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) \\
 = & p_1.
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что, поскольку φ_{it} неотрицательно по определению, то есть $\varphi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$ и $\text{Prob}(\{\varphi_{it} < 0, \exists i \in N \setminus \{0\}, t \in T\}) = 0$, таким образом,

$$\text{Prob}(\{\varphi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T\} \cap \{\varphi_{it} < 0, \exists i \in N \setminus \{0\}, t \in T\}) = 0.$$

То есть, учитывая $\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, неравенство $\psi_{it} \geq I_{it}^+, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$ эквивалентно неравенству $\psi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$. Понятно, что если справедливо неравенство $\psi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, то $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+$ должно быть удовлетворено, в то время как обратное утверждение может быть неверным.

Предположим, $\text{Prob}(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+)$

I_{it}^+) = p_2 , где $p_2 \in [0,1]$, имеем $\text{Prob}(\psi_{it} \geq I_{it}^+, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) \leq$

$\text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+\right)$, то есть

$p_1 \leq p_2$. Можно заметить, если следующие два неравенства, то есть,

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+ \text{ и}$$

$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} + cost' \leq B$, выполняются одновременно,

неравенство $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+ + cost' \leq B$ должно быть выполнено,

но обратное утверждение может быть неверным. Предположим, что

$\text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+ + cost' \leq B\right) = p_3$, где $p_3 \in [0,1]$, и

$\text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} + cost' \leq B\right) = 1$, то имеем

$$\begin{aligned} & \text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+ + cost' \leq B\right) = p_3 \\ & \geq \text{Prob}\left(\left\{\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} I_{it}^+\right\} \cap \left\{\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} + cost' \leq B\right\}\right) \\ & = \text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} I_{it}^+\right) - \\ & \text{Prob}\left(\left\{\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} I_{it}^+\right\} \cap \left\{\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} + cost' > B\right\}\right) \\ & = \text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \psi_{it} \geq \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} I_{it}^+\right) = p_2, \end{aligned}$$

то есть $p_2 \leq p_3$ таким образом $p_1 \leq p_2 \leq p_3$. На основании вышеприведенного утверждения можно получить, что если выполняются следующие неравенства, т.е.,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Prob}(\psi_{it} \geq I_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) = p_1, \\ \text{Prob}(\psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T) = 1, \\ \text{Prob}\left(\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} + cost' \leq B\right) = 1, \\ p_1 \geq 1 - \alpha, \end{array} \right.$$

$$\text{Неравенство } \text{Prob} \left\{ \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot I_{it}^+ + cost' \leq B \right\} = p_3 \geq 1 -$$

α должно быть выполнено. Следовательно, ограничение (7) может быть аппроксимировано следующими тремя неравенствами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{it} \geq 0, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \\ \inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\psi_{it} \geq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \sum_{s=1}^t \xi_{is}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T \right) \geq 1 - \alpha \\ \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} c_{it}^{inv} \cdot \psi_{it} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} c_{ij} \cdot y_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N \setminus \{0\}} f_t \cdot x_{iot} + \\ \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{t \in T} c_{i0}^b x_{iot} + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{h \in H} c_h^a \cdot z_{ih} \leq B \end{array} \right.$$

Приложение В. Аппроксимация распределенно устойчивых случайных ограничений

Вводя вектор $\delta_{it} = [1, \dots, 1, 0, \dots, 0]^T, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, где первые t элементов в этом векторе равны 1, ограничение (27) можно переписать следующим образом:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} \right) \geq 1 - \epsilon_{it}^1, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T,$$

или

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\delta_{it}^T \xi_i \leq I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} \right) \geq 1 - \epsilon_{it}^1, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T,$$

которое может быть консервативно аппроксимировано методом, представленным Zhang et al. (2017)

как:
$$\sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1 \cdot b}{1-\epsilon_{it}^1}} \right) \sqrt{\delta_{it}^T \Sigma_i \delta_{it}} \leq \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^1}{1-\epsilon_{it}^1}} (I_{i,0} + \sum_{s=1}^t q_{is} - \mu_i^T \delta_{it}),$$

$$\forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$$

где значения a, b и γ_1, γ_2 ограничены следующими равенствами: $\gamma_1 = \frac{b}{1-a-b}, \gamma_2 = \frac{1+b}{1-a-b}$. Аналогичным образом вводится новый вектор-столбец

коэффициентов $\pi_{it} = [-1, \dots, -1, 0, \dots, 0]^T, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$, в котором первые t элементов равны -1. Ограничение (28) можно переписать как:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(-\sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq -I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} + \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih} \right) \geq 1 - \epsilon_{it}^2, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T,$$

или $\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\pi_{it}^T \xi_i \leq -I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} + \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih} \right) \geq 1 - \epsilon_{it}^2, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T.$ которое может быть аппроксимировано следующим неравенством:

$$\sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^2 \cdot b}{1-\epsilon_{it}^2}} \right) \sqrt{\pi_{it}^T \Sigma_i \pi_{it}} \leq \sqrt{\frac{\epsilon_{it}^2}{1-\epsilon_{it}^2}} (-I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} + \sum_{h \in H} W_h \cdot z_{ih} - \mu_i^T \pi_{it}), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$$

Кроме того, случайное ограничение (34) может быть переписано как:

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(-\sum_{s=1}^t \xi_{is} \leq \psi_{it} - I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} \right) \geq 1 - \alpha_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T,$$

или $\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}} \text{Prob}_{\mathbb{P}} \left(\pi_{it}^T \xi_i \leq \psi_{it} - I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} \right) \geq 1 - \alpha_{it}, \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T,$

которое может быть аппроксимировано

$$\sqrt{\frac{1}{1-a-b}} \left(1 + \sqrt{\frac{\alpha_{it} \cdot b}{1-\alpha_{it}}} \right) \sqrt{\pi_{it}^T \Sigma_i \pi_{it}} \leq \sqrt{\frac{\alpha_{it}}{1-\alpha_{it}}} (\psi_{it} - I_{i,0} - \sum_{s=1}^t q_{is} - \mu_i^T \pi_{it}), \forall i \in N \setminus \{0\}, t \in T$$

Приложение С. Предварительный анализ

Предварительный анализ (на примере в разделе 5.4) проводится для корректировки входных параметров для SAA и основанного на MIP иерархического подхода. Сначала проверяется влияние θ_1, θ_2 и θ_3 на SAA, и рассматриваются 20 комбинаций θ_1, θ_2 и θ_3 : (1,1,1), (1,1,2), (1,1,3), (1,1,4), (1,1,5), (1,1,6), (1,1,7), (1,1,8), (1,1,9), (1,1,10), (3,3,1), (2,2,1), (4,4,1), (5,5,1), (6,6,1), (7,7,1), (8,8,1), (9,9,1), (10,10,1), (20,20,1).

Результаты расчетов представлены на рис. 20, где числа на горизонтальной оси обозначают вышеуказанные 20 комбинаций. Можно увидеть, что при 20-й комбинации (20, 20, 1) уровень обслуживания и уровень покрытия являются самыми высокими, в то время как уровень риска также является самым высоким. За исключением (20, 20, 1), в 15-й комбинации (6, 6, 1) уровень обслуживания самый высокий, уровень обслуживания самый маленький, а уровень покрытия относительно высокий. Поэтому устанавливаем $\theta_1 = 6, \theta_2 = 6, \theta_3 = 1$ для SAA.

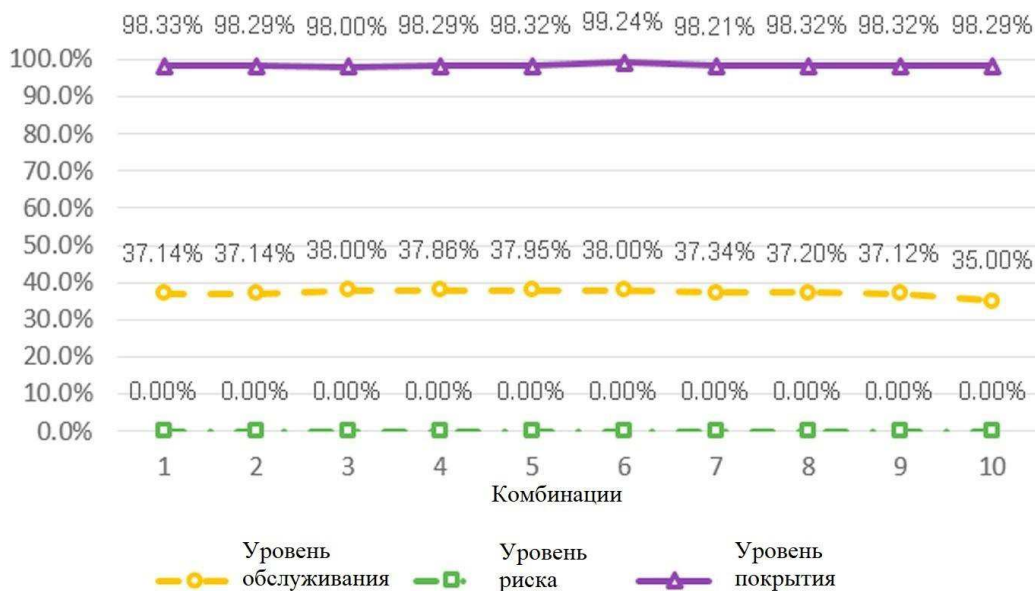


Рисунок 20 - Влияние комбинаций θ_1, θ_2 и θ_3 на SAA.

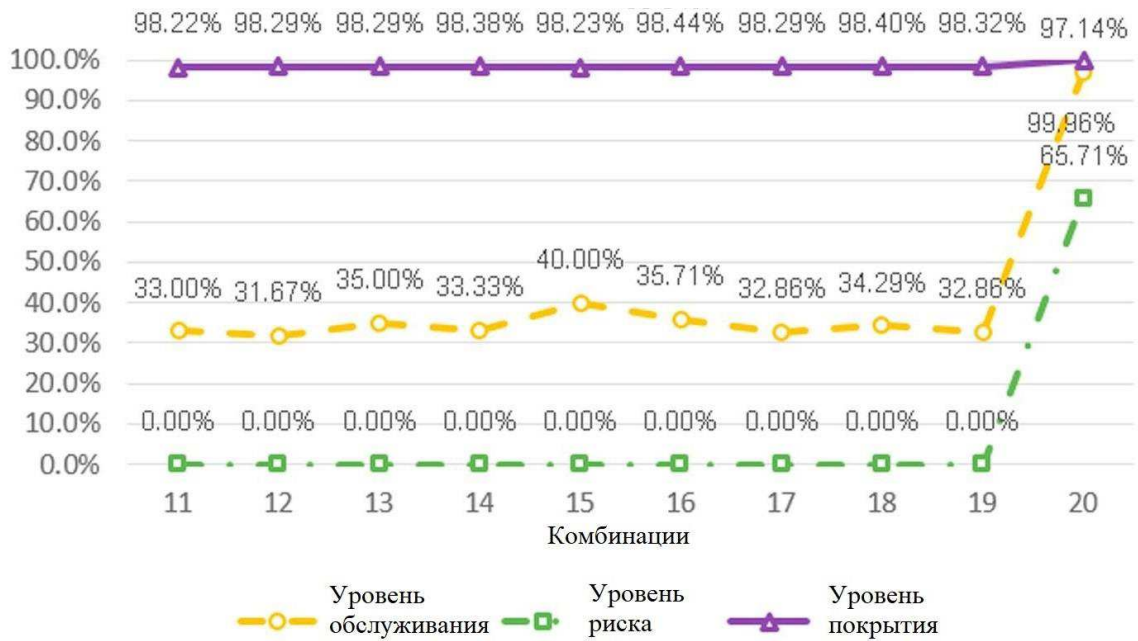


Рисунок 20 - Влияние комбинаций θ_1, θ_2 и θ_3 на SAA.

Предварительный анализ количества сценариев для обучения данных, т. е., $|\Omega|$, исследуется в случае с 17 клиентами, и число сценариев устанавливается в 5, 10, ..., 50. Численные результаты представлены на рис. 21, 22, 23, 24, где количество сценариев обозначено по горизонтальной оси. Можно заметить, что время вычислений увеличивается с ростом $|\Omega|$. Уровни риска и уровни покрытия очень похожи при разных значениях $|\Omega|$. Кроме того, уровень обслуживания, полученный при $|\Omega| = 20$, выше, чем при $|\Omega| = 5, 10, 15$ и аналогично тем, которые получены при других значениях $|\Omega|$. Следовательно, на основе компромисса между временем вычислений и качеством решения $|\Omega|$ устанавливается равным 20.

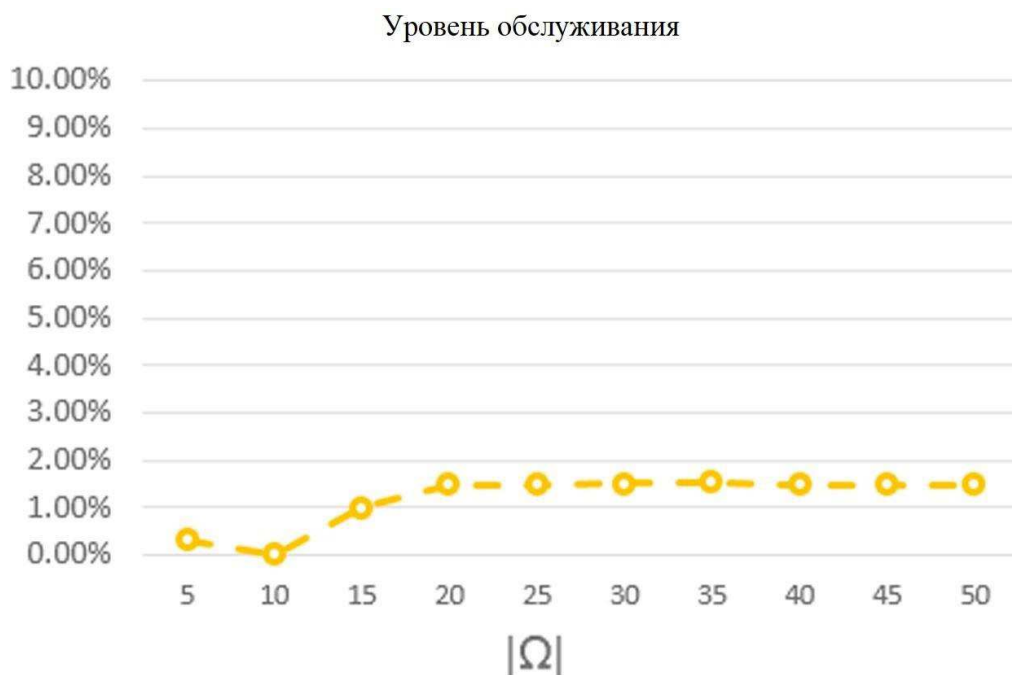


Рисунок 21 - Влияние $|\Omega|$ на SAA.

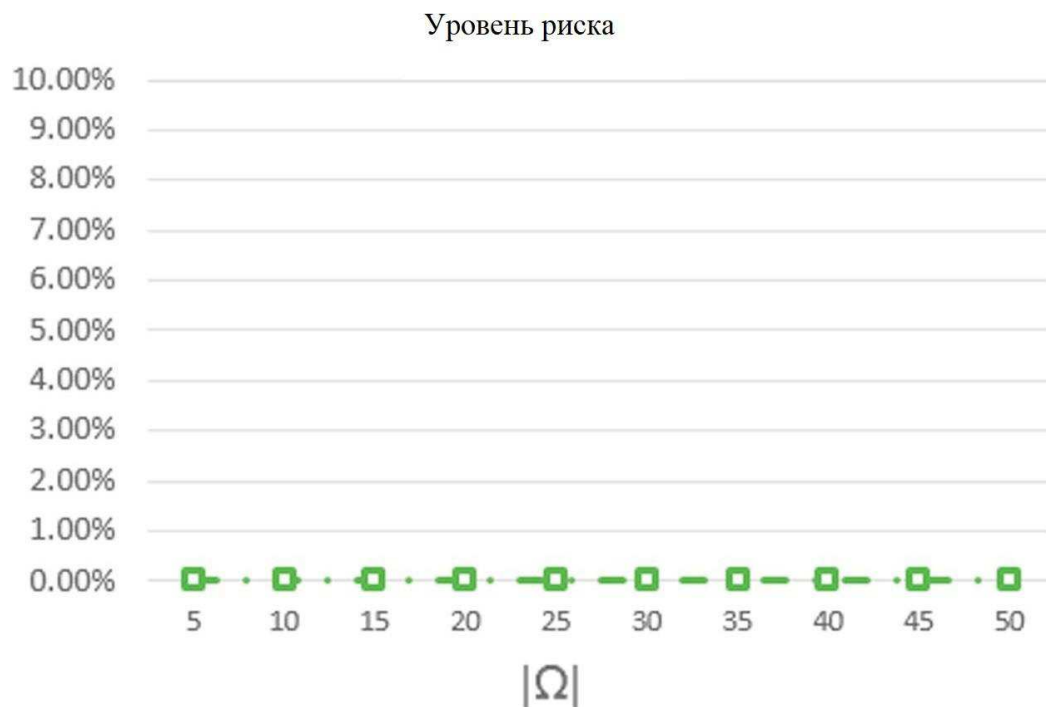


Рисунок 22 - Влияние $|\Omega|$ на SAA.

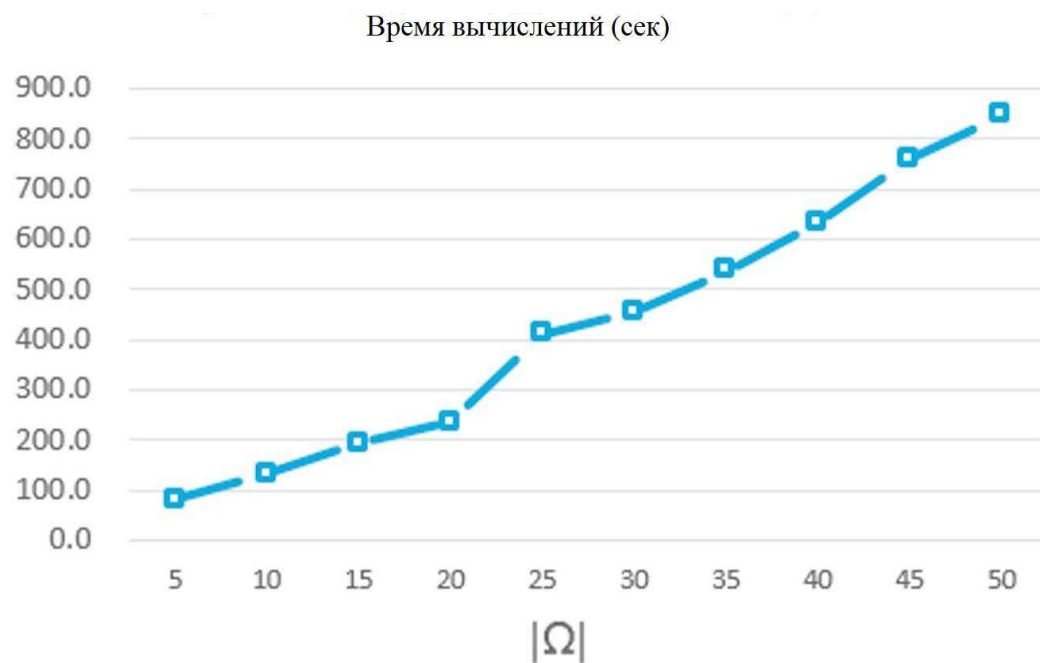


Рисунок 23 - Влияние $|\Omega|$ на SAA.

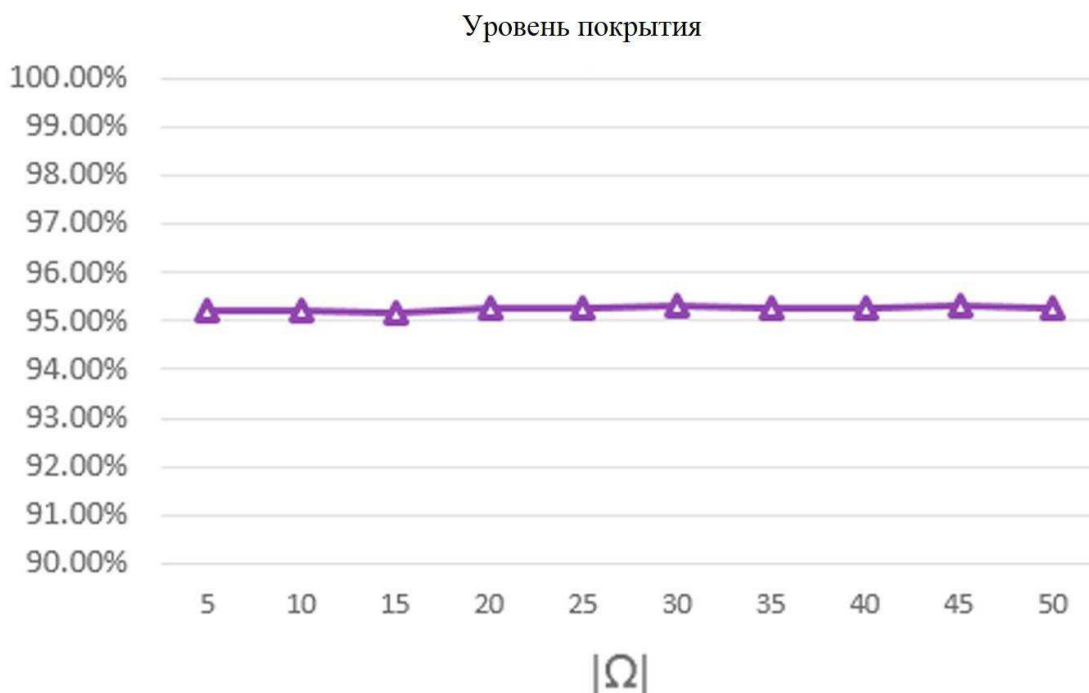


Рисунок 24 - Влияние $|\Omega|$ на SAA.

Чтобы определить комбинацию параметров для иерархического подхода на основе MIP, тестируются 20 комбинаций параметров. Результаты показаны в Таблице 9 и на Рис. 25. Можно заметить, что иерархический подход на основе MIP при $(\gamma_1, \gamma_2) = (0.2, 0.4)$ работает лучше, чем при других комбинациях. Уровень обслуживания, уровень риска и уровень покрытия составляют 40,12%, 0,00% и 98,76% соответственно, которые подчеркнуты и выделены жирным шрифтом в таблице 9 и отмечены красной рамкой на рисунке 25. Его можно получить из таблицы, где средние значения уровня обслуживания, уровня риска и уровня охвата составляют 38,28%, 0,01% и 98,53% соответственно. Самые большие и самые маленькие значения уровня обслуживания составляют 40,12% и 37,14%, самые большие и самые маленькие значения уровня риска составляют 0,03% и 0,00%, а самые большие и самые маленькие значения уровня охвата составляют 98,84% и 98,17%. В целом уровни обслуживания, уровни риска и уровни покрытия очень близки к их средним значениям. Поэтому тренд кривой на рис. 25 неочевиден.

Таблица 9. Влияние параметров γ_1 и γ_2 на иерархический подход на основе MIP.

	(0.1,0.2)	(0.1,0.4)	(0.1,0.6)	(0.1,0.8)	(0.1,1)	(0.2,0.4)	(0.2,0.6)	(0.2,0.8)	(0.2,1)	(0.3,0.4)
Уровень обслуживания	37.14	37.68	38.12	38.03	38.67	40.12	38.98	37.35	38.98	38.24
Уровень риска	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
Уровень покрытия	98.67	98.75	98.57	98.78	98.32	98.46	98.78	98.84	98.31	98.84

Продолжение таблицы 9

	(0.3,0.6)	(0.3,0.8)	(0.3,1)	(0.4,0.6)	(0.4,0.8)	(0.4,1.)	(0.5,0.6)	(0.5,0.8)	(0.6,0.8)	(0.7,0.8)
Уровень обслуживания	37.65	37.95	38.12	39.54	38.98	37.14	37.59	38.28	38.11	38.97
Уровень риска	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Уровень покрытия	98.59	98.38	98.43	98.46	98.45	98.67	98.17	98.36	98.37	98.36

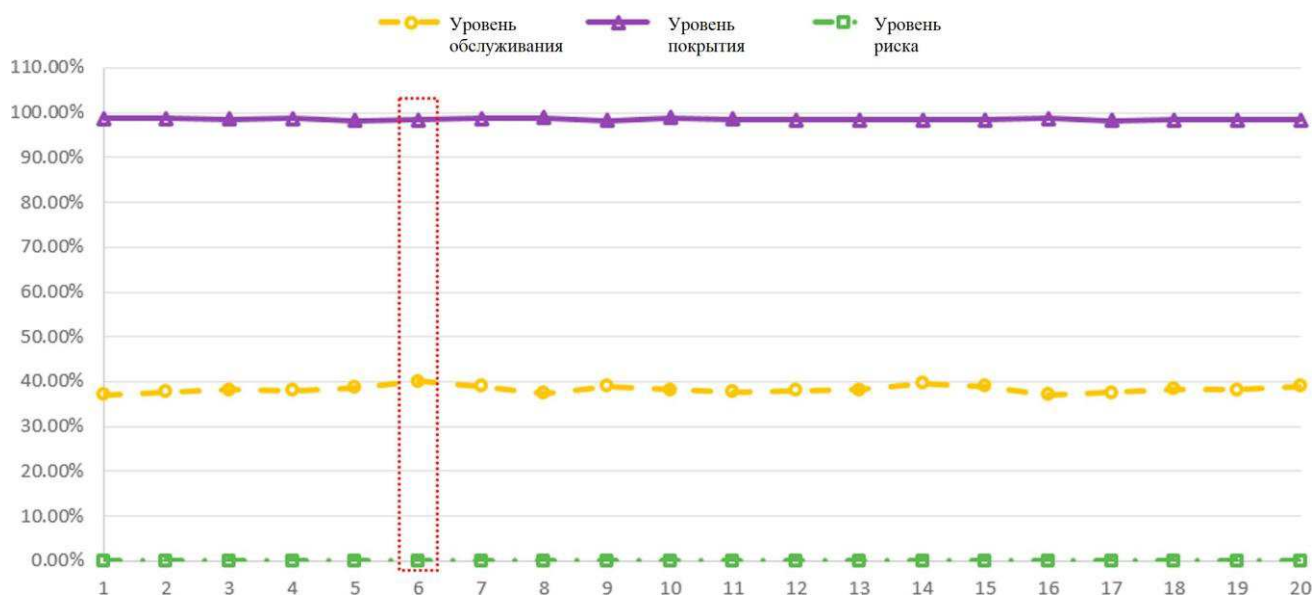


Рис. 25 - Влияние комбинаций γ_1 и γ_2 на МIP-иерархический подход.

Поэтому в численных экспериментах SAA проводится при параметрах $\theta_1 = 6, \theta_2 = 6, \theta_3 = 1$, а иерархический подход на основе МIP - при $\gamma_1 = 0.2$ и $\gamma_2 = 0.4$, чтобы получить решения высокого качества для каждого метода и сделать методы сопоставимыми.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Транспорт»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


подпись

Е.С. Воеводин
инициалы, фамилия

« » 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Управление продажами запасных частей на основе расширения спектра
услуг оптовых продавцов

24.04.03.01 Автомобильный сервис

23.04.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Научный руководитель


подпись, дата

канд. тех. наук, доцент
должность, ученая степень

Князьков А.Н.
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

Митрофанов А.С.
инициалы, фамилия

Рецензент

06.07.20

подпись, дата

магистр техники и технологий
должность, ученая степень

Галимов Р.Р.
инициалы, фамилия

Красноярск 2020