



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ  
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**ФАКУЛЬТЕТ** Управления на воздушном транспорте

**КАФЕДРА** Управления воздушным движением

**Направление подготовки** 25.06.01 Аэронавигация и эксплуатация  
(код и наименование направления подготовки)  
авиационной и ракетно-космической техники

**Направленность** 05.22.13 Навигация и управление воздушным движением  
(наименование направленности)

**НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**Тема** Повышение эффективности регулирования потоков воздушного  
движения путем интеграции дополнительных функций в автоматизированную  
систему управления воздушным движением

**Обучающийся:**

Иванова П.И.

(Ф.И.О.)

(Подпись)

**Научный руководитель:**

к.т.н., доцент Печенежский В.К.

(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**Рецензенты:**

д.т.н., профессор Прохоров А.В.

(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

к.в.н., доцент Субботин Р.А.

(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**Работа допущена к защите:**

**Заведующий кафедрой**

к.и.н., доцент Нечаев В.Н.

(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**МОСКВА 2025**

**Актуальность темы.** Управление потоками воздушного движения и пропускной способностью воздушного пространства являются важнейшими аспектами в сфере управления воздушным движением, наряду с безопасностью полетов. Вопрос актуален в условиях постоянно растущего спроса на трафик, особенно при возникновении непредвиденных событий, которые оказывают влияние на привычное распределение потоков. В условиях сбойных ситуаций, вызванных неблагоприятными погодными условиями, ограничениями на использование воздушного пространства (ИВП), отказами технических средств, периоды пикового спроса - возникает необходимость перераспределения находящихся в воздухе самолетов. Выбор новых траекторий полетов происходит в режиме реального времени, в условиях дефицита времени, основным критерием является безопасность полетов, экономическая составляющая уходит на второй план, во многом развитие ситуации зависит от профессионального опыта диспетчера по управлению воздушным движением и его психоэмоционального состояния в данный момент. В целях повышения эффективности регулирования потоков воздушного движения и снижения незапланированных издержек авиакомпаниями, исследованы принципы изменения маршрутов. Таким образом возникает научная задача, разработки методов автоматизированной поддержки диспетчера, в виде предлагаемых сценариев возможных маршрутов. Данные методы позволят сделать выбор в пользу тех траекторий, которые позволят вносить минимальные манипуляции и тем самым достигать незначительных отклонений от первоначальных параметров маршрута, запрашиваемых авиакомпанией. Итогом проделанной работы является разработка алгоритма для создания информационной системы помощи диспетчеру, позволяющей произвести выбор оптимальных траекторий, основанный на наиболее удачном предыдущем историческом опыте. Интеграция данной системы в действующую автоматизированную систему управления воздушным движением (АС УВД), позволит использовать текущую и архивную плановую информацию о воздушном движении, актуальную

метеоинформацию, информацию о ограничениях ИВП, тем самым осуществлять информационную поддержку диспетчеру на основе исторических сценариев, но с учетом актуальных условий.

**Объект исследования.** Организация регулирования потоков воздушного движения в АС УВД.

**Предмет исследования.** Принципы регулирования потоков воздушного движения на этапе выполнения полетов, методы модернизации организации процессов регулирования потоков воздушного движения в АС УВД.

**Цель исследования.** Создание, исследование и обоснование методов и алгоритмов эффективного автоматизированного регулирования потоков воздушного движения.

**Задачи исследования:**

1. Исследование процесса планирования и регулирования потоков в АС УВД.
2. Анализ эффективности системы регулирования потоков в АС УВД.
3. Оценка изменения маршрутов при распределении потоков воздушного движения.
4. Анализ влияния измененных маршрутов на эффективность полетов.
5. Разработка и обоснование метода автоматизированного выбора маршрута.
6. Разработка алгоритма выдачи оптимальных рекомендаций по распределению потоков воздушного движения.

**Методология и методы исследования.** Для получения результатов использовались эмпирические методы системного анализа и математической статистики. Для оценки эффективности изменения маршрутов применен метод сравнения расхода топлива и имитационного моделирования.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методики автоматизированного процесса по перераспределению потоков воздушных судов в режиме реального времени, в качестве поддержки диспетчера управления

воздушным движением.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения.

**В первой главе** рассматриваются принципы организации регулирования потоков воздушного движения. Данный процесс состоит из нескольких этапов:

- стратегического - предварительный сбор планов полета главным центром единой системы организации воздушного движения (ГЦ ЕС ОрВД), целью которого является составление сезонного расписания, как правило начинается за полгода и завершается за 2 суток до времени совершения полета.

- предтактического – выполняется комплексом средств автоматизации (КСА) планирования и использования воздушного пространства “СИНТЕЗ-ПИВП”. Представляет собой формирование суточного плана воздушного движения по маршрутам ОВД на основе расписания и планов ФПЛ на полеты вне расписания, выполняемые в пределах зоны ответственности, а также планов на полеты ВС государственной и экспериментальной авиации по маршрутам ОВД, выполняемые с аэродромов зоны. Формирование и отображение планов полетов на заданную дату на основе рейсов по расписанию с целью оценки ожидаемой интенсивности воздушного движения. Завершается принятием решения об утверждении/неутверждении заявленных планов, по следующим критериям: правильности кодификации наименований воздушных трасс и точек ВТ; соблюдения направленности движения по участкам ВТ; соблюдения правил эшелонирования (в том числе RVSM); соблюдения правил использования участков ВТ (только для внутренних полетов, только по согласованию и т.д.); соблюдения режимов и ограничений, заявленных на данные сутки; соблюдения регламентов работы основных и запасных аэропортов, представленных в заявке; допустимости приема заявленных типов ВС на основных и запасных аэродромах. соблюдения правил использования классов воздушного пространства (класс А, С, G).

- тактического выполняется посредством КСА планирования и использования воздушного пространства “СИНТЕЗ-ПИВП” контроль поступления информации о ходе реализации суточного плана; осуществляет обработку и автоматизированную передачу планов полетов в АС УВД, оказывает информационную поддержку о

полетах на основании данных, поступающих из ГЦ ЕС ОрВД. На этом же этапе происходит перераспределение потоков воздушного движения диспетчером в случае возникновения осложняющих событий, но уже в мануальном режиме, исходя из профессионального опыта, квалификации и ситуационной осведомленности.

**Во второй главе** описывается влияние осложняющих событий на привычное распределение потоков.

Были исследованы причины, которые явились катализатором изменения маршрутов, и разделены по группам:

- неблагоприятные метеоусловия
- ограничения ИВП
- нештатные ситуации
- перегрузка органов обслуживания воздушного движения (ОВД)
- нарушение работы аэропорта

На рис. 1 представлено наглядно вид события в АС УВД, вызвавшее необходимость изменения маршрутов – внезапное ограничение ИВП.



# пространства

Для выполнения расчетов была собрана статистика причин, вызывающих изменение маршрута с возможными сценариями за период 2023-2024г., гистограмма представлена на рис. 2.

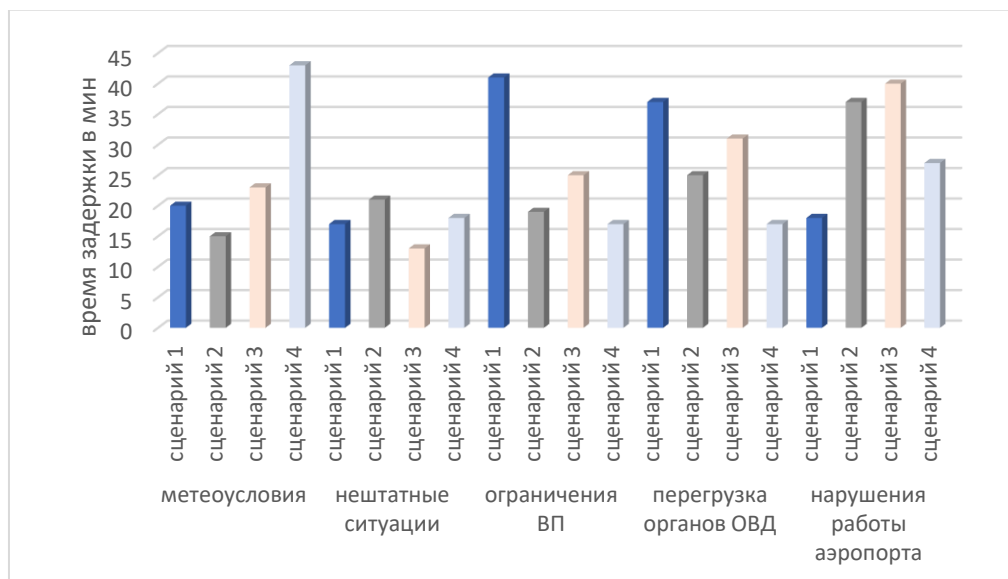
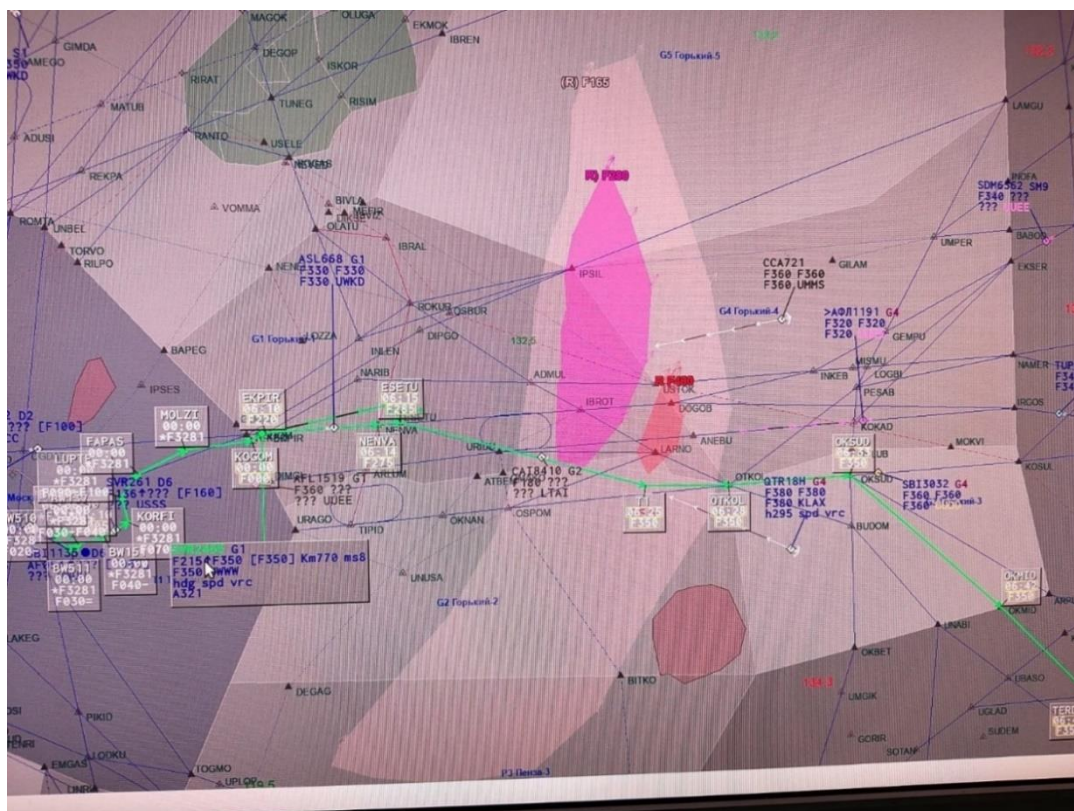


Рисунок 2 Статистика причин и применяемого сценария

На участке маршрута рейса SVR2455, тип ВС А321, эшелон полета 350, проходящего в Московской зоне: KOGOM- ЕКPIR- NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-ОТКОЛ-ОКСУД-ОКМИД, на рис. 3 представлено событие — неблагоприятные метеоусловия, а именно грозовая деятельность и выделен первоначальный маршрут в АС УВД.





### Рисунок 3 Первоначальный маршрут в АС УВД

На рис. 4 представлен фактический маршрут ВС, один из возможных сценариев, который проходит на безопасном удалении от зоны грозового очага.

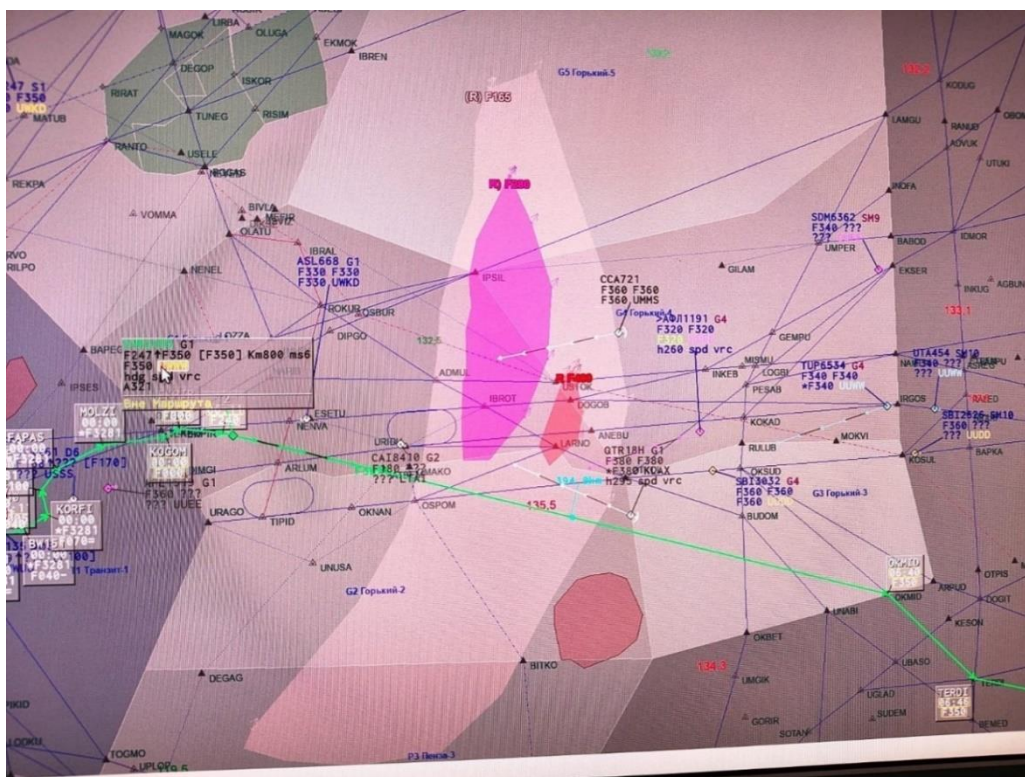


Рисунок 4 Фактический маршрут в АС УВД

Возможные сценарии:

Сценарий 1. KOGOM- ЕКPIR- NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-OTKOL-OKSUD-OKMID набор эшелона 370 – время на участке маршрута осталось бы неизменное.

Сценарий 2. KOGOM- ЕКPIR -OKMID следовать на эшелоне 350 – время на участке маршрута сократилось на 2 минуты.

Сценарий 3. URAGO- UNUSA- OKNAN -OKMID следовать на эшелоне 350 – время на участке маршрута увеличилось бы на 2 минуты.

Сценарий 4. KOGOM- ЕКPIR-NENVA- LARNO-BUDOM-OKMID следовать на эшелоне 350 – время на участке маршрута увеличилось бы на 3 минуты.

Для решения задачи по оптимизации процесса по выбору сценария изменения маршрута будем использовать систему массового обслуживания (СМО). На рис.5 представлена схема одноканальной разомкнутой системы массового обслуживания с неограниченной очередью.



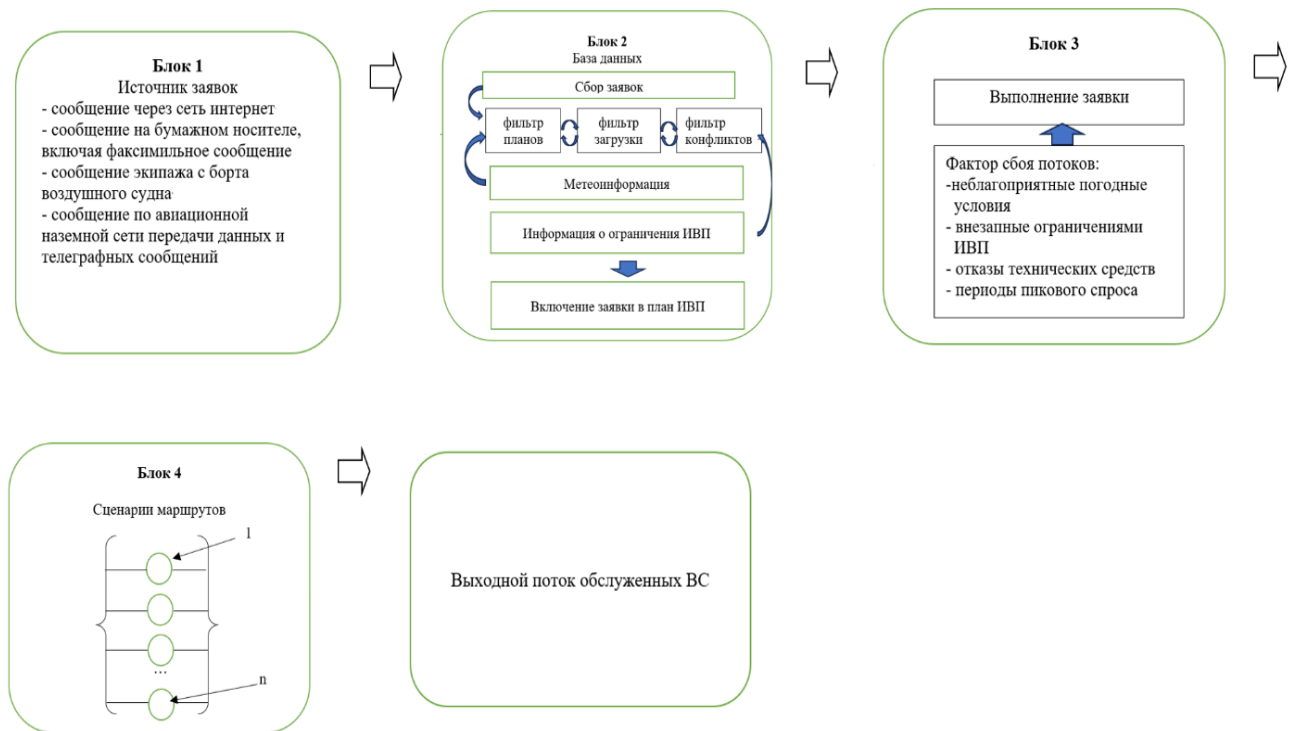


Рисунок 5 Схема одноканальной разомкнутой системы массового обслуживания с неограниченной очередью

Состояния СМО представляются следующим образом:

$S_0$  – канал обслуживания свободен

$S_1$  – канал обслуживания занят- есть событие, вызвавшее сбой потоков ВС, но нет из заявок, для которых необходимо изменение маршрута

$S_2$  – канал обслуживания занят, одна заявка на изменение маршрута обрабатывается

$S_{k+1}$  – канал обслуживания занят,  $k$  заявок обработаны и ждут назначения сценария

$S_{m+1}$  – канал обслуживания занят,  $m$  мест в очереди заняты и ждут обработки

Выражения для вероятностей состояний, которые не зависят от момента времени, при  $t \rightarrow \infty$  рассматриваемой СМО можно записать в следующем виде (1):

$$S_0 \quad P_0 \cdot \lambda_0 \Delta t = P_1 \cdot \mu_0 \Delta t; \Rightarrow \lambda_0 P_0 = \mu_0 P_1 \quad P_0 = \rho_0 \cdot P_1 \quad (1)$$

$$S_1 \quad P_1 \cdot (\lambda_1 + \mu_0) \Delta t = P_0 \cdot \lambda_0 \Delta t + P_2 \cdot \mu_1 \cdot \Delta t; \Rightarrow (\lambda_1 + \mu_0) \cdot P_1 = P_0 \cdot \lambda_0 + P_2 \cdot \mu_1 \quad P_1 = \rho_1 \cdot P_2 \quad (2)$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_0 P_0 = \mu_0 P_1 \\ \lambda_1 P_1 = \mu_1 P_2 \\ \lambda_k P_k = \mu_k P_{k+1} \\ P_0 + P_1 + \dots + P_k = 1 \end{cases} \quad (3),$$

где:  $\lambda$  – интенсивность поступления в СМО заявок

$\mu$  – интенсивность обслуживания заявок

$\rho = \lambda/\mu$  – коэффициент загрузки СМО

Исходя из заявленных норматив пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) районного диспетчерского центра (РДЦ) Московской зоны, представлен на рис. 6.

Утверждено  
приказом филиала «МЦ АУВД»  
ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»  
от «24» сентября 2023 № 155

Заявленные значения нормативов пропускной способности  
диспетчерских пунктов (секторов) РДЦ

Центр ОВД, Отделение ОВД	Диспетчерский пункт (сектор)	Нормативы пропускной способности (ВС/час)			
		1 диспетчер УВД		2 диспетчера УВД	
		Допустимое значение	Предельно допустимое значение	Допустимое значение	Предельно допустимое значение
РДЦ	Сектор В1			57	68
	Сектор В2			57	69
	Сектор В3			60	72
	Сектор В4			59	71
	Сектор В23			57	69
	Сектор В123			57	68
	Сектор В1234			57	68
	Сектор Г1			51	61
	Сектор Г2			59	71
	Сектор Г12			51	61
	Сектор Г3			58	70
	Сектор Г4			59	71
	Сектор Г5			55	66
	Сектор Г45			55	66
	Сектор Г345			55	66
	Сектор 31			56	67
	Сектор 32			55	66
	Сектор 33			50	61
	Сектор 313			50	61
	Сектор 3123			50	61
	Сектор К1			48	57
	Сектор К2			54	65
	Сектор К3			51	62
	Сектор К4			58	70
	Сектор К13			48	57
	Сектор К24			54	65
	Сектор И1			47	57
	Сектор И2			59	71
	Сектор И3			49	56
	Сектор И23			49	56

Рисунок 6 Заявленные нормативы пропускной способности диспетчерских  
пунктов

Для участка маршрута, проходящего в Московской зоне в секторе Г12: KOGOM-EKPIR- NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-OTKOL-OKSUD-OKMID предельно допустимое значение 61 ВС/час,  $\lambda = 1,01$  ВС/мин в среднем на обработку поступающей заявки в сектор (на ведение радиообмена с 1 ВС) диспетчер затрачивает  $\mu = 3$  минуты, но мы исходим из ситуации сбойного движения,

соответственно время на обслуживание заявки увеличивается в 2 раза, исходим что  $\mu = 6$  минут, на вход  $m=3$  заявки, которые ждут обработки. Проведем анализ работы СМО. Определим коэффициент загрузки СМО  $\rho = 0,34$ . Выражения для финальных вероятностей состояний рассматриваемой СМО при одинаковой интенсивности поступления заявок и их обслуживании  $\lambda_i = \lambda$ ,  $\mu_i = \mu$ , ( $i = 0 \dots m$ ) можно представить в виде формулы (4):

$$P_0 = (1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^m)^{-1} = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+1}} = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+1}}, \quad (4)$$

Получаем  $P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+1}} = 0,17$ , поступившая в СМО заявка получает отказ в обслуживании, если СМО находится в состоянии  $S_{m+1}$ , т.е. вероятность отказа в обслуживании заявки - на назначение сценария маршрута равна

$$P_{m+1} = \rho^{m+1} P_0, \quad (5)$$

$P_{m+1} = 0,009 \approx 0,1$ , т.е. 1% заявки всего лишь не будут обслужены - что является хорошим показателем. Определим среднее время пребывания в очереди для назначения сценария по формуле (6):

$$t_{оч} = \frac{L_{оч}}{\lambda} = \frac{1 \cdot p_2 + 2 \cdot p_3 + \dots + m \cdot p_{m+1}}{\lambda}, \quad (6)$$

$t_{оч} = 0,92 \approx 1$  мин, выводы проведенного исследования подтверждают, что время ожидания на назначения сценария в 1 мин вполне допустимо, однако увеличение количества заявок на обработку, приведет к возрастанию среднего времени пребывания в очереди. Автоматизированная поддержка процесса по назначению сценария позволит затрачивать меньше времени на обработку заявки и обратит внимание диспетчера на приоритетный сценарий для пользователей.

**В третьей главе** рассматривается процесс по организации маршрутов авиакомпаниями, который осуществляется при помощи программного пакета Аэрология. Для расчета стоимости авиаперелета используют параметр кост индекс, что является соотношением затрат на расход топлива (и, соответственно, цене топлива) за это же время к оплате времени полета экипажу воздушного судна,



лизинговых платежей и других издержек для выполнения рейса. По данным статистики из архива АС УВД, по ВС выполнившим полеты в Московской зоне за 2023-2024г., представлена на гистограмме на рис. 7, тип А321, является наиболее часто встречающимся типом ВС.

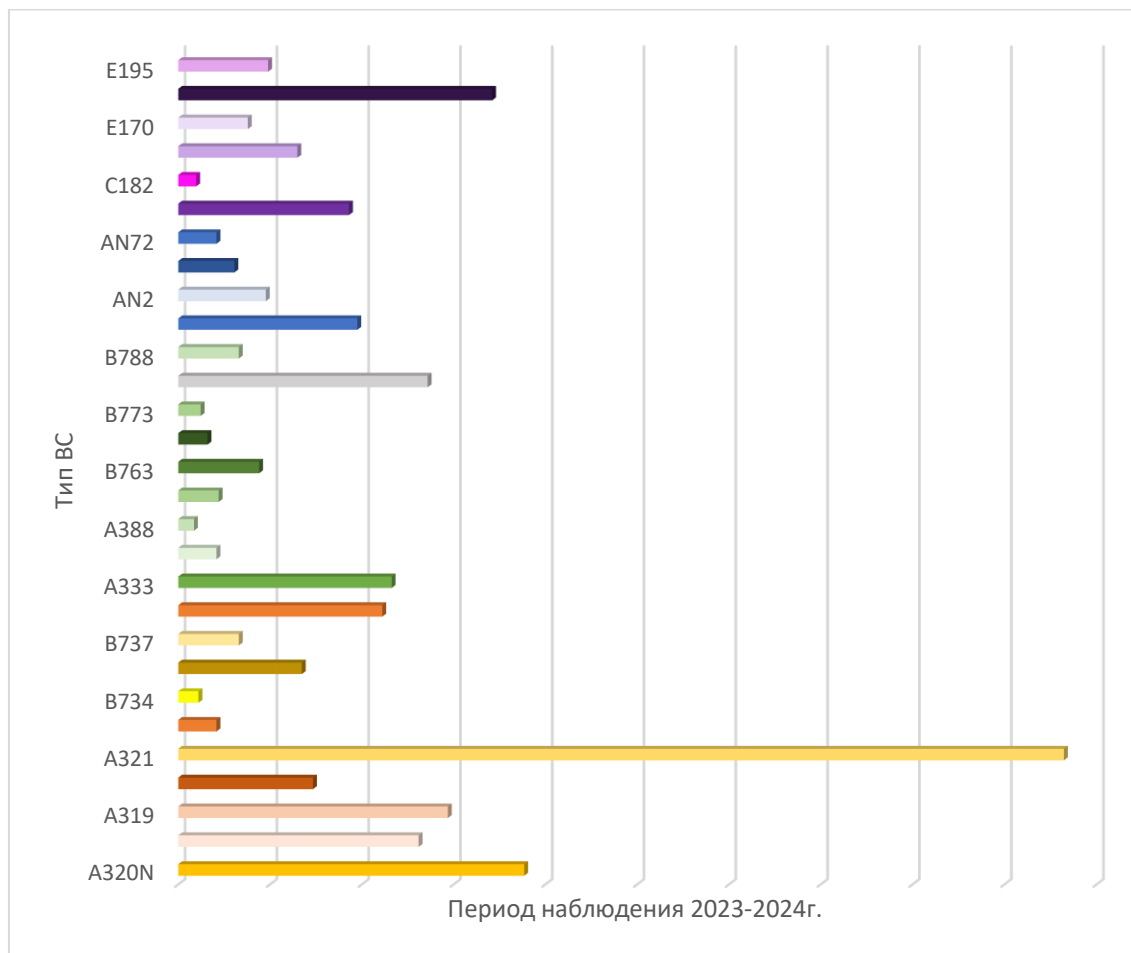


Рисунок 7 Количество рейсов в % от общего числа за период наблюдения 2023-2024г.

Для участка маршрута, проходящего в Московской зоне: KOGOM- ЕКPIR-NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-OTKOL-OKSUD-OKMID, для ВС тип А321, при помощи программного пакета Аэрология сравним параметр кост индекс с затратами топлива на данном участке для сценария 1,2,3 и 4 соответственно, представлено в табл. 1.

Тип ВС	Изначальный маршрут			Сценарий 1			Сценарий 2			Сценарий 3			Сценарий 4		
A321	KOGOM-EKPIR-NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-OTKOL-OKSUD-OKMID			KOGOM-EKPIR-NENVA-ESETU-IRBOT-LANRO-OTKOL-OKSUD-OKMID			KOGOM-EKPIR -OKMID			URAGO-UNUSA-OKNAN-OKMID			KOGOM-EKPIR-NENVA-LARNO-BUDOM-OKMID		
FL	FL 350			FL 370			FL 350			FL 350			FL 350		
Скорость М	М 0,67			М 0,67			М 0,67			М 0,67			М 0,67		
Кост индекс	30	20	10	30	20	10	30	20	10	30	20	10	30	20	10
Расход топлива	5734	5631	5592	5801	5691	5612	5612	5531	5484	5821	5698	5652	5846	5783	5761

Таблица 1 Изменение расхода топлива в зависимости от сценария

Зависимость расхода топлива при одинаковых показателях кост индекса для выбранных сценариев представлен на рис. 8.

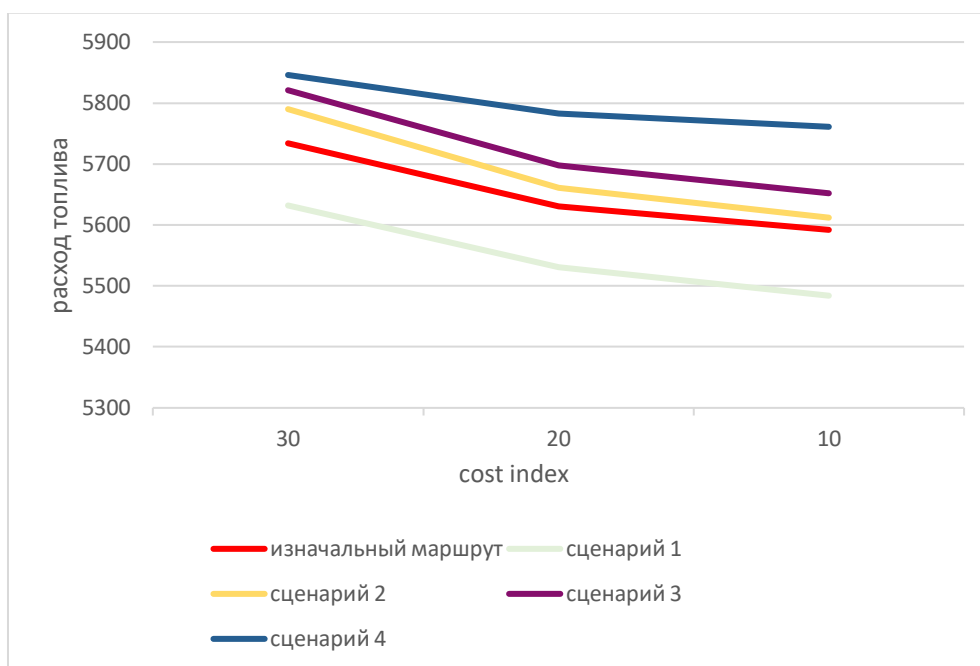


Рисунок 8 Зависимость расхода топлива от сценария

Из данных таблицы 1 можно сделать вывод, что при одинаковых значениях параметра кост индекс, расход топлива в зависимости от сценария будет варьироваться.

Произведем ранжирование сценариев по группам:

- сценарии группы 1. Следование по исходному маршруту, использование точек маршрута по плану, спрямление в пределах маршрута, сохранение исходных параметров скорости и высоты полета по поданному плану.
- сценарии группы 2. Следование по исходному маршруту, но с изменением параметров полета – скорости и высоты полета.
- сценарии группы 3. Следование по измененному маршруту, сохранение исходных параметров скорости и высоты полета.
- сценарии группы 4. Следование по измененному маршруту, с изменением параметров полета – скорости и высоты полета.

Повышение эффективности процесса по выбору сценария достигается путем минимизации необоснованных расходов топлива пользователями при возникновении осложняющих событий. Основываясь на архивных данных фактических выполненных полетов, и их сравнение с плановыми данными за этот

же период вызывает заключение, что в приоритете для пользователей ВП сценарий группы 1 - вызывающий минимальные отклонения на данном участке от заявленных пользователями параметрами в виде плана полета. В случае, когда выбор сценария группы 1 невозможен из соображения безопасности, необходимо переходить к рассмотрению сценария группы 2, так как сценарии из этой группы имеют незначительные отклонения по расходу топлива, если снова не удастся применить сценарий группы 2, тогда необходимо переходить к сценарию группы 3 и так далее, исходя из соображения снижения необоснованного расхода топлива.

На основании вышеизложенного был разработан алгоритм, представленный на рис. 9 по выбору оптимального сценария.



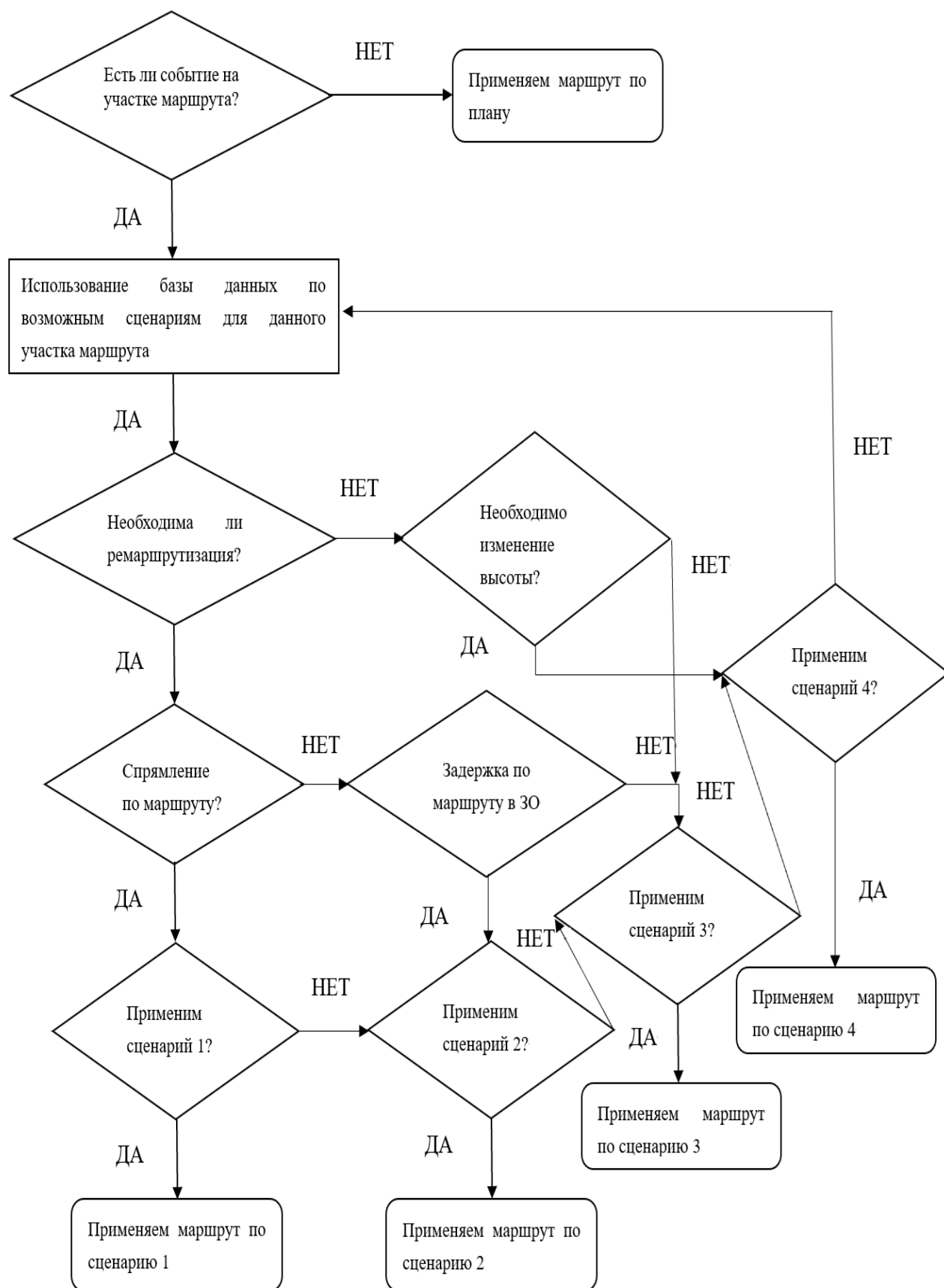


Рисунок 9 Алгоритм по автоматизированному выбору сценария

Моделирование процесса по автоматизированному выбору сценария выполнен на базе пакета программирования Statistica Advanced Linear, предназначенного для статистического анализа данных. Среда поддерживает создание базы данных, проектирование алгоритмов и выполнение компьютерных экспериментов в соответствии с созданной моделью, включая различные виды анализа. Используя данные таблицы 1 и выполнение поэтапных запросов, согласно предложенного алгоритма, приведет к выбору оптимального сценария для данной ситуации. На рис. 10 представлен результат эксперимента – график вероятности распределения сценариев по критерию расхода топлива. Изначальный маршрут обозначен цифрой 0, далее идет сценарий 1 и сценарий 2, как видно из распределения это и есть оптимальные сценарии для выбора, чего нельзя сказать о сценарии 3 и 4.

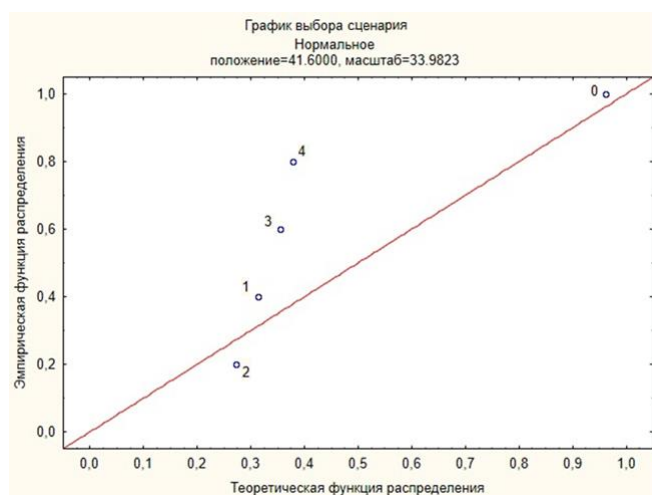


Рисунок 10 График вероятности распределения сценария исходя из расхода топлива

### Заключение

По результатам исследования выявлены осложняющие события, влияющие на привычное распределение маршрутов воздушного движения, произведен анализ процесса по выбору сценария, который позволил определить ключевые параметры, ранжировать сценарии по приоритетности и разработать алгоритм для автоматизации поддержки принятия решений по выбору сценария, исходя из соображений минимизации необоснованно затрачиваемых пользователями

ресурсов. Автоматизированная поддержка в режиме реального времени окажет информационную поддержку диспетчеру, повысит ситуационную осведомленность, снизит возрастающую нагрузку на диспетчера и позволит больше времени уделять первоочередной задаче - поддержание должного уровня безопасности полетов.