



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ ИМЕНИ ГЛАВНОГО  
МАРШАЛА АВИАЦИИ А.А. НОВИКОВА»  
(ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова)**

*На правах рукописи*

Луговой Вениамин Геннадьевич

**МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ  
ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ  
СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РЕВЕРСИВНЫХ ЭШЕЛОНОВ**

2.9.6 Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель**

доктор технических наук

**Плясовских Александр Петрович**

Санкт-Петербург - 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ .....	13
1.1. Традиционные методы организации воздушного движения прибывающих воздушных судов.....	13
1.1.1. Применение зоны ожидания и стандартного маршрута прибытия (STAR).....	13
1.1.2. Векторение в целях организации воздушного движения прибывающих воздушных судов .....	15
1.2. Система слияния потоков.....	16
1.2.1. Варианты структуры системы слияния потоков .....	18
1.2.2. Принципы формирования потока прибывающих воздушных судов в системах слияния потоков.....	25
1.3. Характеристики потоков воздушного движения прибывающих воздушных судов на аэродромах, где применяются системы слияния потоков .	32
Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ .....	41
2.1. Модель традиционной системы слияния потоков.....	41
2.2. Модель традиционной системы слияния потоков с помощью сети массового обслуживания.....	50
2.3. Исследование традиционной системы слияния потоков с помощью представленной модели.....	52
Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ И МЕТОДА ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ .....	57
3.1. Модель усовершенствованной системы слияния потоков .....	57
3.2. Сравнительный анализ традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков .....	63

3.3. Разработка метода организации воздушного движения прибывающих воздушных судов с использованием усовершенствованной системы слияния потоков .....	68
Выводы по главе 3.....	79
<b>ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ТРЕНАЖЕРА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ .....</b>	<b>82</b>
4.1. Моделирование усовершенствованной системы слияния потоков с использованием диспетчерского тренажёра .....	82
4.1.1. Измеряемые параметры и исходные данные для моделирования с использованием диспетчерского тренажера.....	82
4.1.2. Особенности проведения моделирования с использованием диспетчерского тренажера .....	85
4.1.3. Результаты проведенного моделирования с использованием диспетчерского тренажера .....	86
4.1.4. Выводы по результатам проведенного моделирования с использованием диспетчерского тренажера .....	90
4.2. Оценка эффективности метода организации воздушного движение прибывающих воздушных судов и использованием усовершенствованной системы слияния потоков.....	91
4.2.1. Пропускная способность.....	91
4.2.2. Эффективность выполнения полетов .....	99
4.2.2.1. Дополнительное полетное время в воздушном пространстве узлового диспетчерского района.....	99
4.2.2.2. Дополнительный расход топлива.....	102
4.2.3. Охрана окружающей среды .....	104
4.2.4. Стоимость выполнения полетов.....	106
Выводы по главе 4.....	107
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>114</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>129</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Системы Point Merge (далее системы слияния потоков) включающие траектории задержки, расположенные с взаимным перекрытием и расположением траекторий задержки в створе взлетно-посадочной полосы (ВПП) внедрены на некоторых аэродромах Российской Федерации. Подобные системы слияния потоков воздушных судов (ВС) применяются на аэродромах: Санкт-Петербург (Пулково) [1], Екатеринбург (Кольцово) [2], Уфа, Махачкала (Уйташ) [3], Калининград (Храброво) [4], Хабаровск (Новый) [5], Нальчик [6], Новосибирск (Толмачево) [7]. Кроме того, подобные системы слияния потоков являются распространёнными не только в Российской Федерации, но и во многих других аэропортах Мира [8 – 13]. Существует перспектива проектирования и внедрения подобных систем для других аэропортов Российской Федерации [14 – 16].

Преимущества внедрения систем слияния потоков связаны с существенным снижением загруженности диспетчера УВД при организации воздушного движения прибывающих ВС за счет применения процедур зональной навигации вместо векторения [17 - 25]. При этом оказалось, что в случае применения систем слияния потоков в условиях неравномерных потоков прибывающих ВС наблюдается снижение пропускной способности системы слияния потоков до 41,6 % [26, 27, 28]. Таким образом, в условиях интенсивного воздушного движения (при неравномерном распределении прибывающих ВС), использование систем слияния потоков приводит к увеличению дополнительного полетного времени, увеличению потребления авиационного топлива и увеличению выбросов загрязняющих атмосферу веществ [29].

Возникает необходимость поиска решения, при котором сохраняются преимущества систем слияния потоков, а показатели эффективности аэронавигационного обслуживания не зависят от равномерности распределения прибывающих ВС по направлениям прибытий. Схожесть внедренных систем слияния потоков, применяемых на многих аэродромах, позволяет выработать

общие положения по практическому применению данных систем в целях определения оптимального метода организации воздушного движения прибывающих ВС.

Поставленная в диссертации научная задача соответствует пункту 9 «Аэронавигационное обеспечение полетов, закономерности процессов навигации, управления движением отдельных воздушных судов и их потоков» и пункту 10 «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением» паспорта научной специальности 2.9.6. «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники».

**Степень разработанности темы исследования.** Общий подход к эффективности аэронавигационного обеспечения ВС при прибытии, ожидании и заходе на посадку изложен в рекомендуемой практике ИКАО и документах организации EUROCONTROL [30 – 34]. В Российской Федерации процессы аэронавигационного обслуживания ВС при прибытии, ожидании и заходе на посадку отражены в соответствующих Федеральных авиационных правилах [35 – 37]. Одной из основных задач диспетчерского обслуживания подхода является построение очередности заходов и создание необходимых интервалов на посадку между прибывающими ВС. Для решения данной задачи применяются различные методы (полет по стандартному маршруту с применением зоны ожидания, наведение посредством векторения), создаются соответствующие элементы структуры воздушного пространства.

В последнее время среди разработчиков структуры воздушного пространства интенсивно используется система Point Merge, разработанная организацией EUROCONTROL и впервые внедренная в аэропорту Дублин в 2008 году. Опыт применения системы Point Merge в аэропорту Дублин, Осло и ряде других аэропортов позволил создать методический материал по внедрению и использованию данной системы, который представлен в документах организации EUROCONTROL [38 – 40]. Однако, при адаптации системы Point Merge к

условиям неравномерного движения прибывающих ВС, проявляется ряд проблем, которые снижают эффективность использования данной системы при ОрВД.

Вопросам повышения эффективности аэронавигационного обеспечения полетов прибывающих ВС посвящены работы Крыжановского Г.А., Алешина В.И., Пятко С.Г., Губенко С.Г., Глухова Ю.Е., Барановского А.М. Ассорова Н.А., Кулакова М.В., Дивак Н.И., Ключникова Ю.И., Александрова Э.М. и др. [8, 14 – 16, 20, 41 – 46].

Однако проблема организации воздушного движения прибывающих ВС в условиях неравномерного движения и высоких транспортных нагрузок не имеет законченного решения. Следовательно, решение научной проблемы повышения эффективности аэронавигационного обеспечения прибывающих ВС в аэропортах гражданской авиации РФ является актуальной.

**Объект исследования.**

Организация воздушного движения прибывающих ВС.

**Предмет исследования.**

Процессы слияния потоков прибывающих ВС.

**Цели и задачи диссертации.**

Целью диссертации является разработка метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков для повышения эффективности аэронавигационного обеспечения полетов на этапах прибытия и захода на посадку в условиях различного распределения потоков прибывающих воздушных судов.

В соответствии с целью данного исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ процессов и методов организации воздушного движения прибывающих ВС, в том числе с использованием систем слияния потоков.
2. Разработка математической модели традиционной системы слияния потоков, с использованием сети массового обслуживания, позволяющей проанализировать использование систем слияния потоков, с учетом реального распределения потоков прибывающих ВС.

3. Разработка математической модели усовершенствованной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания и проведение имитационного моделирования усовершенствованной системы слияния потоков с учетом реального распределения потоков, прибывающих ВС.

4. Разработка усовершенствованной системы слияния потоков.

5. Разработка метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков.

6. Оценка эффективности аэронавигационного обслуживания при применении усовершенствованной системы слияния потоков.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель традиционной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания с обратной связью, позволяющая исследовать процессы применения систем слияния потоков с учетом различных по интенсивности потоков прибывающих ВС. Аналогов разработанной модели в зарубежной и отечественной научной литературе не выявлено.

2. Разработана математическая модель усовершенствованной системы слияния потоков, *отличающаяся* от модели традиционной системы слияния потоков использованием нескольких каналов обслуживания, системы массового обслуживания зоны ожидания диспетчерского пункта подхода (вместо одного), количество каналов обслуживания динамически изменяется в зависимости от соотношения интенсивностей потоков прибывающих ВС.

3. Разработана усовершенствованная система слияния потоков, *отличающаяся* использованием нескольких эшелонов для полета по траектории задержки вместо одного (при использовании одной и той же точки входа), с возможностью использования реверсивного движения по эшелонам на траекториях задержки, что обеспечивает повышение эффективности аэронавигационного обслуживания полетов прибывающих ВС. Реверсивные эшелоны распределяются между точками входа в зависимости от интенсивности потоков прибывающих ВС.

4. Разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС в условиях высокой интенсивности воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков, *отличающийся*:

- использованием реверсивных эшелонов на траекториях задержки;
- распределением количества представляемых реверсивных эшелонов между точками входа на траектории задержки в соответствии с предлагаемым правилом;
- выводом прибывающих ВС с одного направления на предоставленные реверсивные эшелоны с использованием вертикального эшелонирования.

#### **Теоретическая и практическая значимость диссертации.**

Разработана математическая модель системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания, позволяющая исследовать систему слияния потоков в условиях различного распределения потоков прибывающих ВС. Математическая модель разработана впервые. Ранее, в целях исследования процессов связанных с организацией воздушного движения прибывающих ВС на основе системы слияния потоков, использовались экспериментальные методы, такие как моделирование на диспетчерском тренажере или моделирование на имитаторе воздушной обстановки в ускоренном режиме (Fast time simulation). С помощью разработанной модели определены закономерности, определяющие пропускную способность системы слияния потоков, среднее время задержки ВС и другие характеристики процессов слияния потоков.

С учетом выявленных закономерностей, определенных для традиционной системы слияния потоков разработана модель усовершенствованной системы слияния потоков. Модель усовершенствованной системы слияния потоков отличается от модели традиционной системы слияния потоков использованием нескольких каналов обслуживания системы массового обслуживания диспетчерского пункта подхода (вместо одного). При этом количество каналов обслуживания динамически изменяется в зависимости от соотношения интенсивностей потоков прибывающих ВС. Сами каналы обслуживания являются

общими для обеих систем массового обслуживания диспетчерских пунктов подхода.

На основе полученных в результате исследований усовершенствованной системы слияния потоков данных, разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков.

Практическая значимость диссертации заключается в повышении эффективности аэронавигационного обслуживания. Наибольший рост эффективности достигается в условиях предельно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки. Практически значимыми результатами на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) являются:

- увеличение пропускной способности системы слияния потоков на величину до 70%;
- сокращение суммарного среднего времени ожидания прибывающих ВС с 180 до 32 минут в сутки;
- снижение дополнительного расхода топлива (топлива затрачиваемого для задержки ВС) с 8 до 1,5 тонн в сутки;
- уменьшение количества вредных выбросов загрязняющих атмосферу веществ с 24 до 4,3 тонн в сутки.

**Методология и методы исследования.** В целях решения поставленных в диссертации задач и выработки рекомендаций, были использованы методы математического моделирования с использованием аппарата систем массового обслуживания, математической статистики, теории случайных процессов, для подтверждения теоретических результатов проводилось полунатурное моделирование с использованием диспетчерских тренажеров.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель системы слияния потоков прибывающих ВС основанная на сети массового обслуживания, позволяющая исследовать процессы слияния потоков в традиционной системе слияния потоков.

2. Математическая модель усовершенствованной системы слияния потоков прибывающих ВС основанная на сети массового обслуживания, отличающаяся от модели традиционной системы слияния потоков использованием динамически распределяемых каналов обслуживания.

3. Метод организации воздушного движения прибывающих ВС основанный на модели усовершенствованной системы слияния потоков с использованием реверсивных эшелонов, динамически распределяемых между точками входа на траектории задержки в зависимости от соотношения интенсивности потоков прибывающих ВС, а также применением вертикального эшелонирования для ВС, прибывающих на одну из траекторий задержки. Метод позволяет повысить пропускную способность системы слияния потоков в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих ВС по точкам входа на траектории задержки.

#### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием апробированных научных методов исследований и современного математического аппарата обработки результатов, данными полунатурного моделирования с использованием диспетчерских тренажеров, а также практическим применением усовершенствованной системы слияния потоков в аэропорту Санкт-Петербург (Пулково), что подтверждается актами внедрения.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 научных конференциях:

1. Научно – практический семинар «Совершенствование аэронавигационного обслуживания на аэродромах», филиал НИИ «Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, г. Москва, 26.06.2014.

2. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Состояние и перспективы развития аэронавигационной системы России», Институт Аэронавигации, г. Москва, 15.05.2019.

3. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов», Институт Аэронавигации, г. Москва, 03.12.2020.

4. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов», Институт Аэронавигации, г. Москва, 01.12.2021.

#### **Публикации.**

Полученные результаты диссертации изложены в 10 научных публикациях, 5 из которых являются публикациями в журналах перечня рекомендованного ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [26, 28, 47 – 49]. Пять публикаций в изданиях индексируемых базой данных РИНЦ [27, 50 – 53].

#### **Связь работы с крупными научными программами.**

Работа непосредственно связана с концепцией блочной модернизации авиационной системы, в соответствии с глобальным аэронавигационным планом ИКАО [54, 55].

#### **Личный вклад.**

Личным вкладом автора является содержание данной работы и положения, выносимые на защиту. Автор принимал личное непосредственное участие в подготовке проекта модернизации и внедрении новой структуры воздушного пространства района аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) впервые включающего усовершенствованную систему слияния потоков. Содержание опубликованных работ и данной диссертации являются выработанными автором решениями, подкрепленными экспериментальными исследованиями и непосредственной практикой использования.

#### **Реализация результатов работы.**

Представленный в диссертации метод организации воздушного движения прибывающих ВС, отражен в виде нормативных положений в технологиях работы

диспетчеров УВД аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС используется на тренажерных комплексах при проведении практической подготовке персонала ОВД, а также в процессе обучения. Система слияния потоков ВС аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) разработана с учетом применения метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков. Результаты диссертации применяются на комплексном диспетчерском тренажере «Галактика» используемом для целей обучения персонала ОВД Аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Имеются соответствующие акты о внедрении результатов диссертационной работы (представлены в приложении).

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация включает введение 4 главы и заключение. Диссертация состоит из 128 страниц. В диссертации используются 44 рисунка и 17 таблиц. Список литературы состоит из 104 наименований.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Организация воздушного движения представляет собой динамичный и комплексный процесс обслуживания воздушного движения, организации потоков воздушного движения и воздушного пространства, осуществляемый безопасным, экономичным и эффективным образом путем предоставления средств и непрерывного обслуживания в сотрудничестве и взаимодействии всех заинтересованных сторон с использованием бортовых и наземных функций.

Таким образом, организация воздушного движения прибывающих ВС должна осуществляться безопасным, экономичным и эффективным способом. Организация воздушного движения прибывающих ВС, в том числе, включает в себя формирования необходимых продольных (временных) интервалов на посадку между несколькими претендующими на посадку ВС на одну и ту же ВПП, при этом ВС, очередь которых еще не подошла должны выполнять полет в режиме ожидания [41 – 46, 56 – 66].

### 1.1. Традиционные методы организации воздушного движения прибывающих воздушных судов

Существуют следующие методы организации воздушного движения прибывающих ВС:

- применение зон ожидания и стандартного маршрута прибытия STAR;
- векторение.

#### 1.1.1. Применение зоны ожидания и стандартного маршрута прибытия (STAR)

Применение стандартного маршрута прибытия и зоны ожидания, расположенной на нем является классическим примером организации воздушного движения прибывающих ВС. Метод имеет многолетний опыт применения.

Стандартные маршруты прибытия, разработанные для использования в рамках данного метода, как правило, ориентированы по кратчайшему расстоянию от точки входа в узловой диспетчерский район до точки выхода на посадочную прямую. ВС, которым задержка не требуется, следуют по маршруту прибытия непосредственно к посадочной прямой, процедуры задержки не применяются. В тоже время, ВС, которым требуется задержка, указывается выполнить полет в зоне ожидания. После того как требуемый на посадку интервал достигнут, ВС выводится из зоны ожидания и продолжает полет по маршруту прибытия по направлению к посадочной прямой. Метод является очень простым в применении, может применяться практически в любых условиях, за исключением необходимости обхода опасных для выполнения полетов метеоявлений. **Недостатком** данного метода является низкая точность формирования интервала на посадку и избыточная минимальная задержка. Таким образом, при использовании такого метода, ВС, как правило, прибывают к ВПП с интервалами существенно больше заданных. Суть метода, включающего применение зон ожидания и полета с использованием стандартного маршрута прибытия (STAR) представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Применение стандартного маршрута прибытия (STAR) и зон ожидания

### 1.1.2. Векторение в целях организации воздушного движения прибывающих воздушных судов

В данном случае ВС выполняют прибытие на основе задаваемых диспетчером курсов следования. При этом, тем ВС, которым задержка не требуется, назначаются курсы следования, выводящие ВС к посадочной прямой по кратчайшему расстоянию. Тем ВС, которым требуется задержка, задается серия курсов, которая позволяет задерживать ВС на необходимое время для формирования интервала на посадку. После того, как интервал на посадку сформирован, ВС направляется к посадочной прямой. Метод является наиболее гибким, с точки зрения применения и может быть использован в любой воздушной обстановке. Переход на использование данного метода может быть произведен, практически в любой момент выполнения полета в узловом диспетчерском районе. Векторение активно применяется в случае возникновения непредвиденных и аварийных ситуаций, так как применение метода не требует наличия сложных навигационных приборов у экипажа и заранее подготовленных навигационных данных, достаточно лишь наличие магнитного компаса. При небольшом количестве, находящихся на связи у диспетчера ВС, метод может демонстрировать высокую точность формирования интервалов на посадку. **Недостатком** данного метода является очень высокая загруженность диспетчера УВД по каналу радиосвязи в связи с необходимостью передачи большого количества диспетчерских указаний. Кроме того, диспетчер УВД постоянно должен учитывать приоритетность передачи указаний конкретным ВС, в целях задания соответствующей траектории полета. Суть метода, заключающего в применении векторения, представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Применение векторения

## 1.2. Система слияния потоков

**Система слияния потоков (Point Merge System)** – комплекс стандартных траекторий прибытия, сформированных особым образом и методологии их использования, предназначенные для организации воздушного движения прибывающих ВС.

Особенностью системы слияния потоков является наличие комплекса стандартных маршрутов прибытия, часть которых представляют собой элементы, предназначенные для задержки ВС (траектория задержки). Такие элементы представляют собой, как правило, дугообразные участки равноудаленные от точки слияния. Точка слияния, как правило, располагается на посадочной прямой, в месте, где начинается промежуточный этап захода на посадку. Система слияния потоков обычно имеет несколько траекторий задержки, например две траектории задержки. Количество траекторий задержки соответствует количеству основных

направлений прибытия ВС, полет по траектории задержки возможен только на одном эшелоне. В таком методе, ВС, которым задержка не требуется, направляются напрямую на точку слияния с применением процедуры «прямо на». ВС, которым требуется незначительная задержка (например, до 5 минут), попадают на траекторию задержки, по которой выполняют полет до момента формирования требуемого интервала на посадку. После того как требуемый интервал на посадку сформирован, ВС с траектории задержки направляется диспетчером УВД на точку слияния, для направления используется процедура «прямо на». ВС, которым требуется значительная задержка, первоначально направляются в зону ожидания, расположенную на стандартном маршруте прибытия, когда величина требуемой задержки уменьшается до приемлемых величин, ВС направляется на входную точку траектории задержки с использованием процедуры «прямо на».

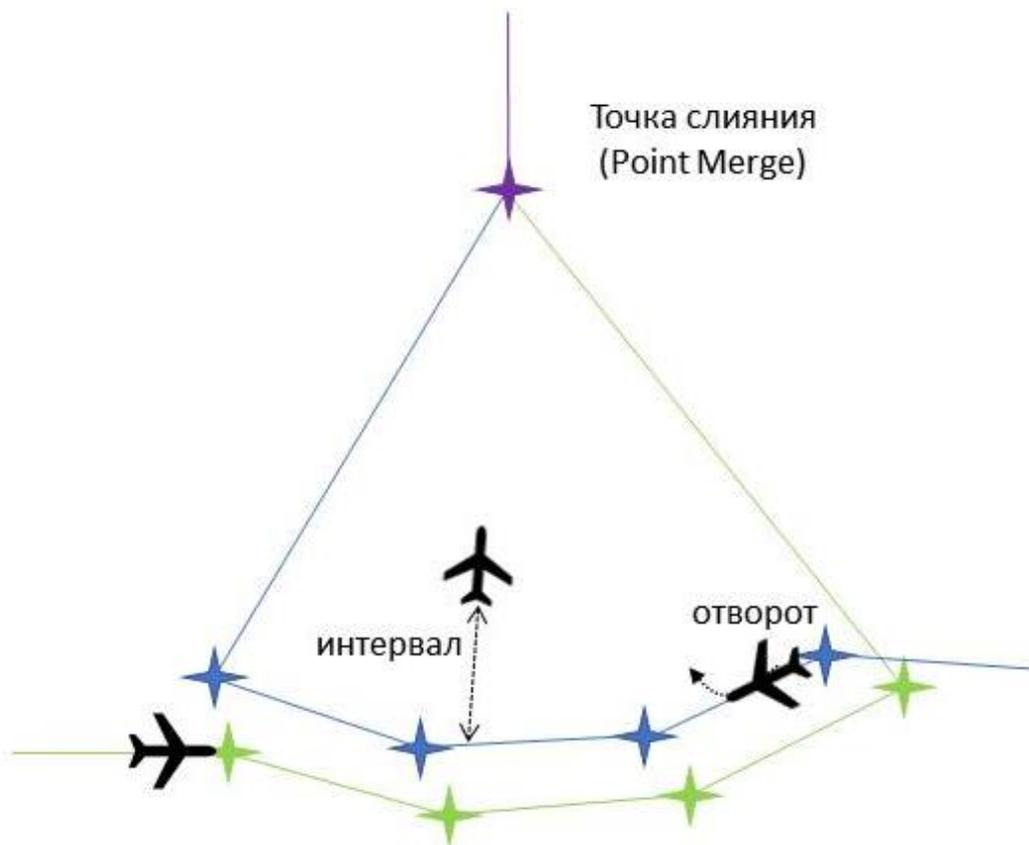


Рисунок 1.3 – Отворот ВС с траектории задержки и следование на точку слияния

**Недостатком** данного метода является низкая пропускная способность в условиях, когда поток прибывающих ВС имеется только с одного направления прибытия, так как на траектории задержки допускается полет только на одном эшелоне.

### 1.2.1. Варианты структуры системы слияния потоков

В общем случае система слияния потоков состоит из следующих ключевых элементов:

1. Траектория или траектории задержки, которые могут иметь различное расположение. Точки конкретной траектории задержки, насколько это возможно равноудалены от точки слияния.
2. Участков маршрутов (как правило, стандартных маршрутов прибытия) обеспечивающих подход к траекториям задержки.
3. Точки или точек входа на траекторию или траектории задержки.
4. Маневренной зоны, представляющей собой зону в которой ВС выполняет полет от траектории задержки по направлению к точке слияния.
5. Непосредственно точку слияния (Point Merge).

Комбинация расположения данных элементов может быть достаточно различной. Различные виды систем слияния потоков отличаются определенными преимуществами и недостатками [67]. Общий вид элементов системы слияния потоков представлен на рисунке 1.4

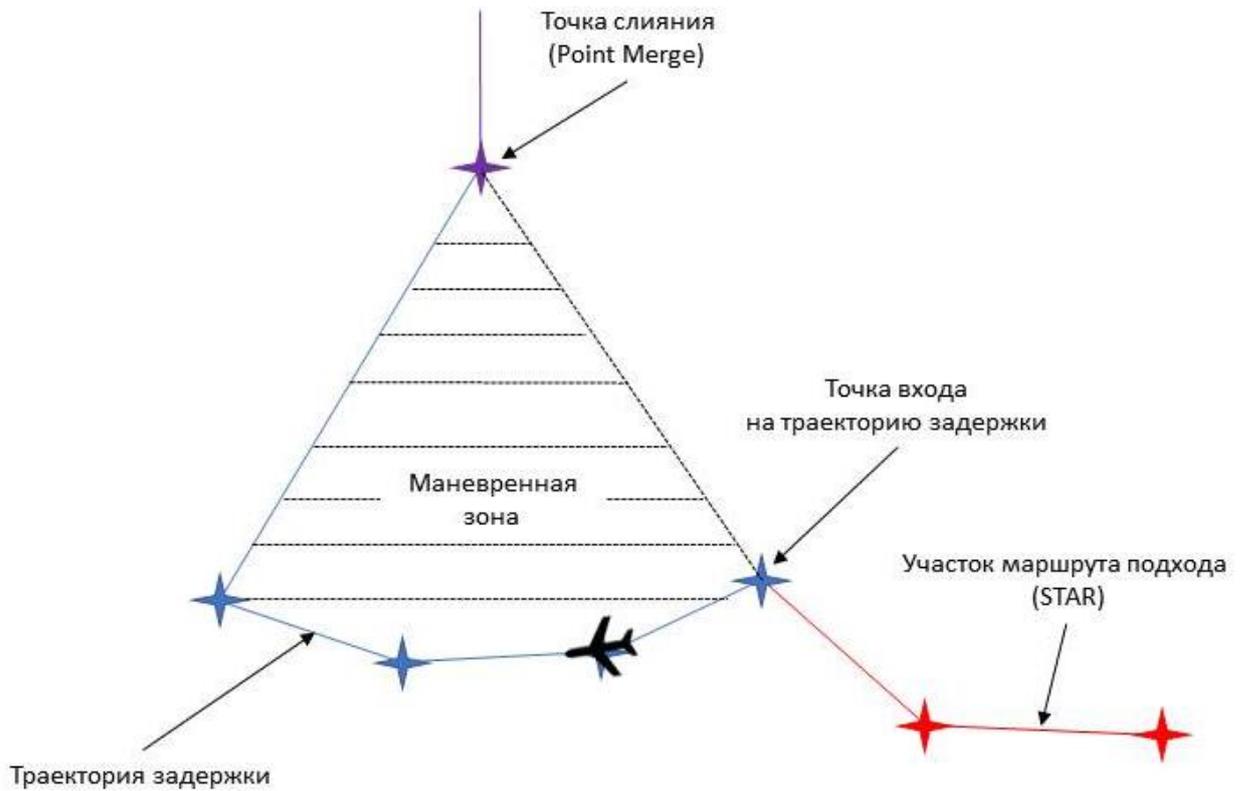


Рисунок 1.4 – Общий вид системы слияния потоков

При наличии нескольких траекторий задержки, используемых в системе слияния потоков, сами траектории задержки могут располагаться, не перекрывая друг друга, частично перекрывая друг друга или иметь взаимное перекрытие. Вид системы Point Merge, с расположением траекторий задержки без перекрытия, представлен на рисунке 1.5.

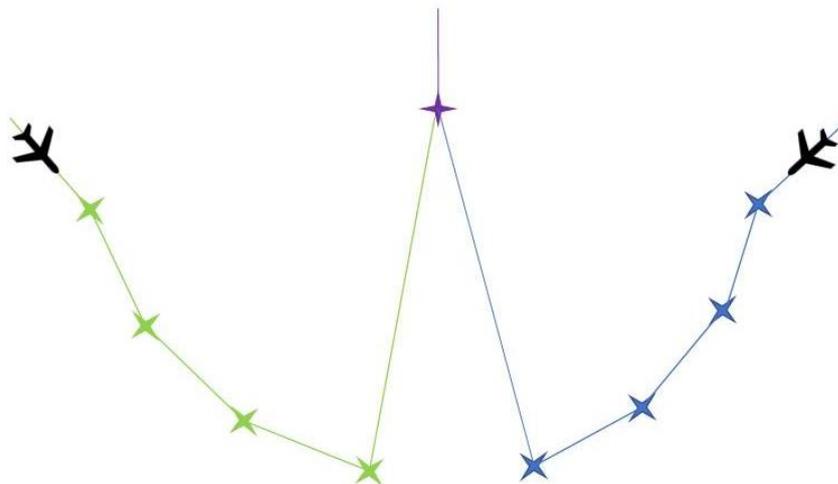


Рисунок 1.5 – Траектории задержки расположенные без перекрытия

Преимуществом расположения траекторий задержки без перекрытия является отсутствие встречного движения по траекториям задержки, таким образом, нет необходимости смещать траектории задержки на несколько разную дистанцию относительно точки слияния. ВС, находящиеся на разных траекториях задержки, могут совершать полет на одинаковых эшелонах. Недостатком такого расположения траекторий является существенный разнос местоположения ВС. Диспетчеру УВД, осуществляющего формирование очередности заходов на посадку с использованием системы слияния потоков, в этом случае, необходимо часто переносить внимание на достаточно удаленные друг от друга области воздушного пространства. Другим существенным недостатком, препятствующим качественному формированию интервалов на посадку, является существенная разница в направлениях подхода к точке слияния. В этом случае, для диспетчера УВД, сложно учитывать скорости движения ВС с учетом того, что разница во влиянии ветра может быть практически противоположной. С точки зрения расположения самих траекторий, требуется больший объем воздушного пространства, что может быть препятствием для расположения такой конструкции в оптимальном месте.

Вид системы слияния потоков, с расположением траекторий задержки с частичным взаимным перекрытием, представлен на рисунке 1.6.

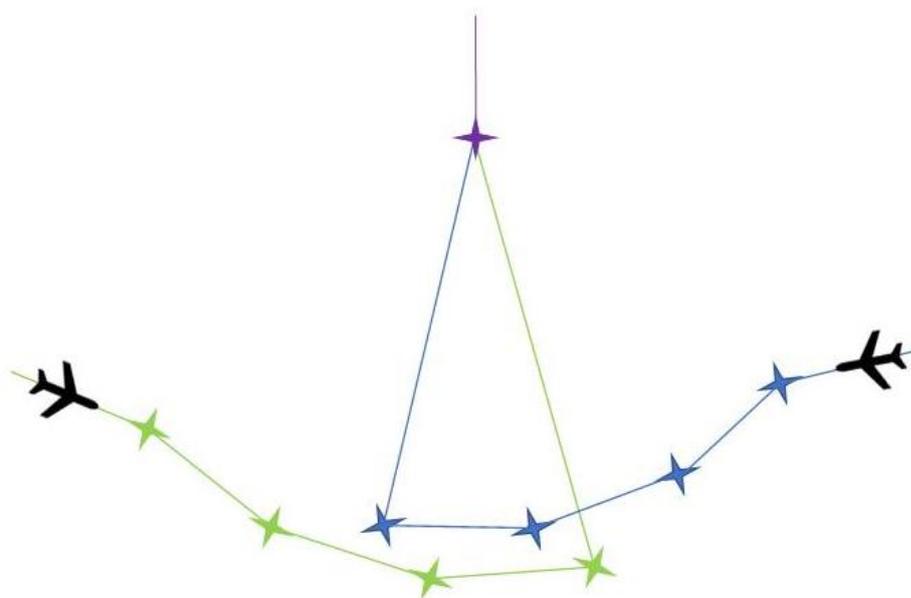


Рисунок 1.6 – Траектории задержки расположенные с частичным перекрытием

Преимуществом расположения траекторий задержки с частичным взаимным перекрытием является меньший объем воздушного пространства для расположения траекторий задержки, в сравнении с объёмом воздушного пространства используемого для траекторий задержки без перекрытия. В данном типе системы слияния потоков удаленность траекторий задержки друг относительно друга не так велика, что позволяет более эффективно оценивать воздушную обстановку. Кроме того, разница в направлениях подхода к точке слияния также составляет меньшую величину, что позволяет снизить влияние разницы ветрового режима на формирование интервалов для захода на посадку. Основной особенностью данного типа траекторий является то, что, некоторые части траекторий задержки взаимно перекрывают друг друга. В результате, для снижения рисков нарушения интервалов эшелонирования полет по траекториям задержки выполняется на разных эшелонах, а сами траектории задержки несколько смещены по удалению относительно точки слияния. К недостаткам данного типа траекторий следует отнести повышенный объем воздушного пространства, необходимый для размещения всей системы маршрутов прибытия.

Вид системы слияния потоков, с расположением траекторий задержки с полным взаимным перекрытием, представлен на рисунке 1.7.

Системы слияния потоков, имеющие траектории задержки с взаимным перекрытием, как правило, имеет по две дугообразных траектории для задержки ВС, полеты по которым выполняются навстречу. Одна из траекторий является внешней, расположенной на несколько большем удалении от точки слияния (Point Merge), другая траектория является внутренней, расположенной несколько ближе к точке слияния. Траектории удалены друг относительно друга на величину 2 – 3 км. Такое разнесение траекторий предназначено для обеспечения возможности устойчивого раздельного наблюдения отметок от ВС на индикаторе воздушной обстановки (в связи с ограничениями, связанными с разрешающей способностью систем наблюдения ОВД), а также с целью уменьшения риска столкновения. Дугообразные участки траекторий задержки, как правило, равноудалены от Point Merge.

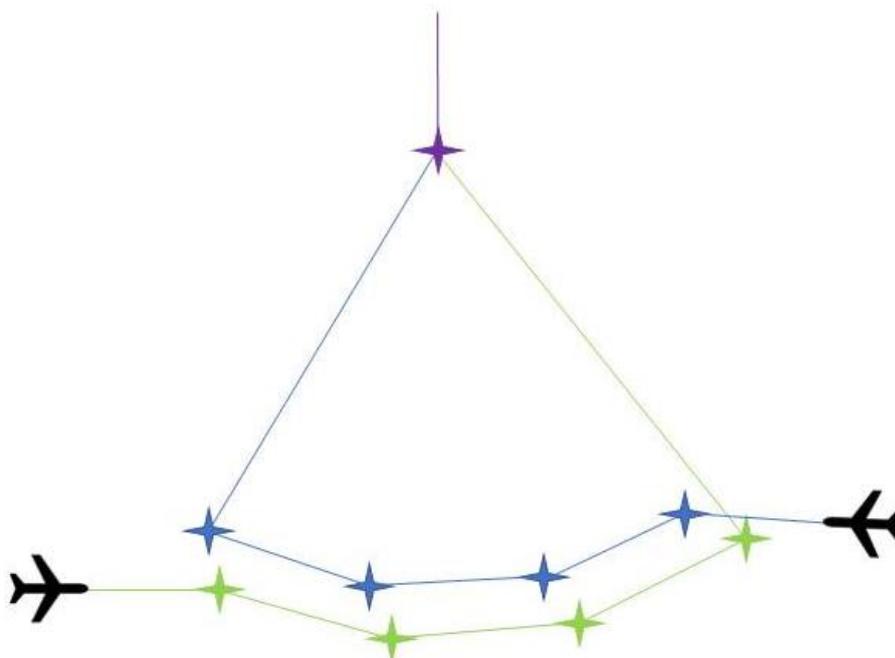


Рисунок 1.7 – Система слияния потоков, в которой траектории задержки расположены с полным взаимным перекрытием

Как видно из рисунка 1.7 траектории задержки полностью взаимно перекрывают длину друг друга, в результате диспетчер УВД при использовании такой системы слияния потоков наблюдает ВС приблизительно в одной области воздушного пространства. Что позволяет своевременно и эффективно оценивать взаимное положение ВС. При таком расположении траекторий задержки требуется минимальный объем воздушного пространства. Разница во влиянии ветрового режима также оказывается минимальной в сравнении с другими вариантами систем слияния потоков. Так как траектории задержки взаимно перекрывают друг друга, в целях снижения рисков нарушения интервалов эшелонирования, полет по траекториям задержки выполняется на разных эшелонах, а сами траектории задержки несколько смещены по удалению относительно точки слияния.

Траектории задержки могут быть размещены в различных областях воздушного пространства относительно направления ВПП: сбоку от ВПП (рисунок 1.8), с противоположных сторон от посадочной прямой (рисунок 1.9), в створе ВПП (рисунок 1.10).

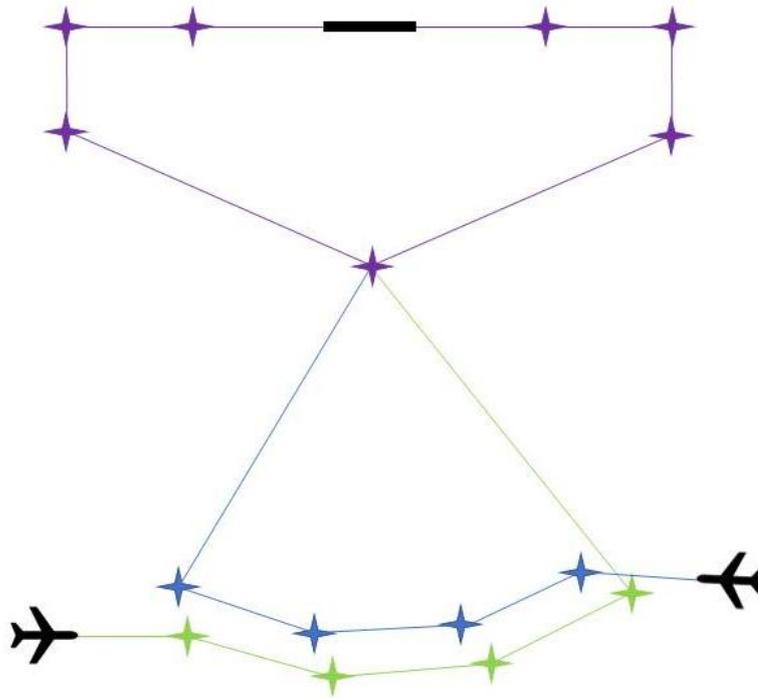


Рисунок 1.8 – Расположение траекторий задержки сбоку от ВПП

Расположение траекторий задержки сбоку от ВПП, как правило, применяется в местах со сложной структурой воздушного пространства, где располагать элементы задержки возможно именно таким образом, ввиду наличия запретных зон, зон ограничений и других элементов воздушного пространства, мешающих оптимальному расположению.

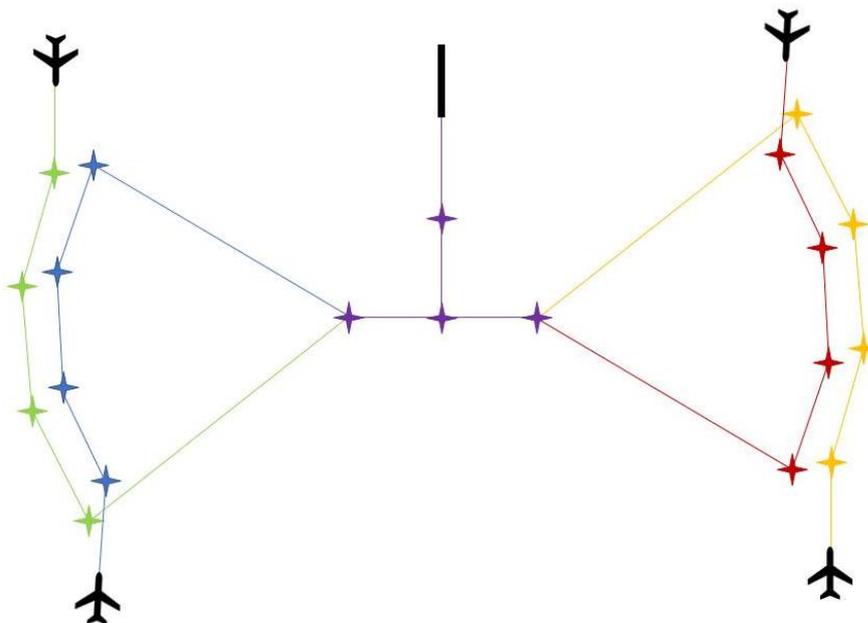


Рисунок 1.9 - Расположение траекторий задержки с противоположных сторон относительно посадочной прямой

Расположение траекторий задержки с противоположных сторон от ВПП применяется в случае, если иные элементы воздушного пространства препятствуют размещению траекторий задержки в створе ВПП. При этом, имеется довольно большие потоки воздушного движения с противоположных сторон ВПП.

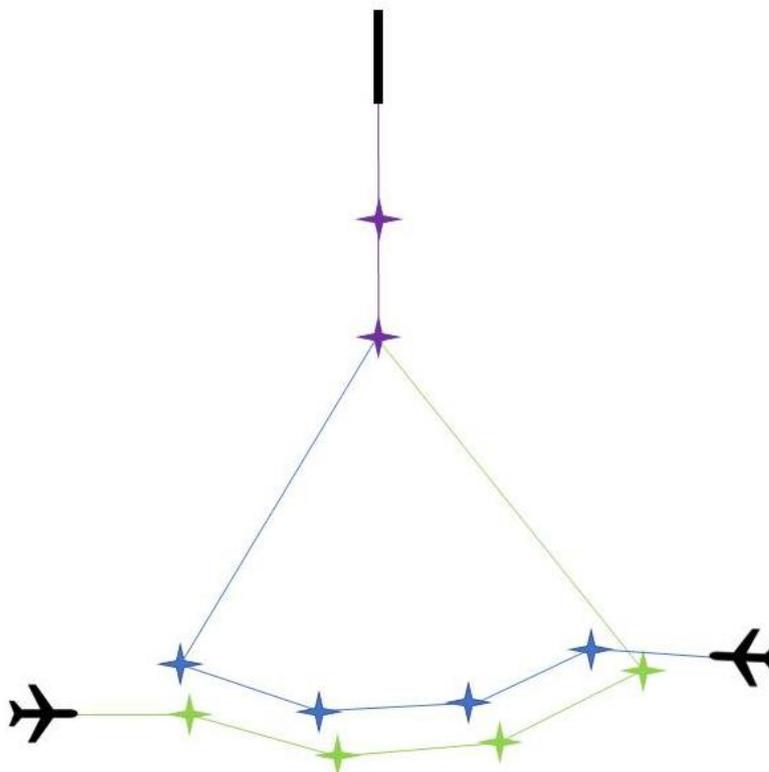


Рисунок 1.10 - Расположение траекторий задержки с взаимным перекрытием в створе ВПП

Наибольшую популярность имеет расположение траекторий в створе ВПП. В тех местах, где это возможно, траектории располагают именно в створе ВПП, так как это позволяет наиболее качественно учитывать ветровой режим и управлять распределением внимания диспетчера УВД. Такое расположение траекторий задержки применяется в тех аэропортах, где имеется достаточно количество свободного воздушного пространства.

Точка слияния (Point Merge) в таких системах располагается на продолжении посадочной прямой. Зачастую данная точка является контрольной

точкой промежуточного этапа захода на посадку. Сами траектории задержки являются частями соответствующих стандартных маршрутов прибытия.

### 1.2.2. Принципы формирования потока прибывающих воздушных судов в системах слияния потоков

Системы слияния потоков применяются, прежде всего, для формирования потока прибывающих ВС.

ВС попадают на траектории задержки через определенные точки входа. До пролета точки входа ВС, как правило, выполняет полет по стандартному маршруту прибытия, конфигурация которого зависит от конкретной структуры воздушного пространства. При выполнении полета по траектории задержки, диспетчер УВД определяет момент отворота с траектории задержки для конкретного ВС и направляет данное ВС в сторону точки слияния (Point Merge). На рисунке 1.11 отражен процесс выполнения при следовании по траектории задержки на точку слияния.

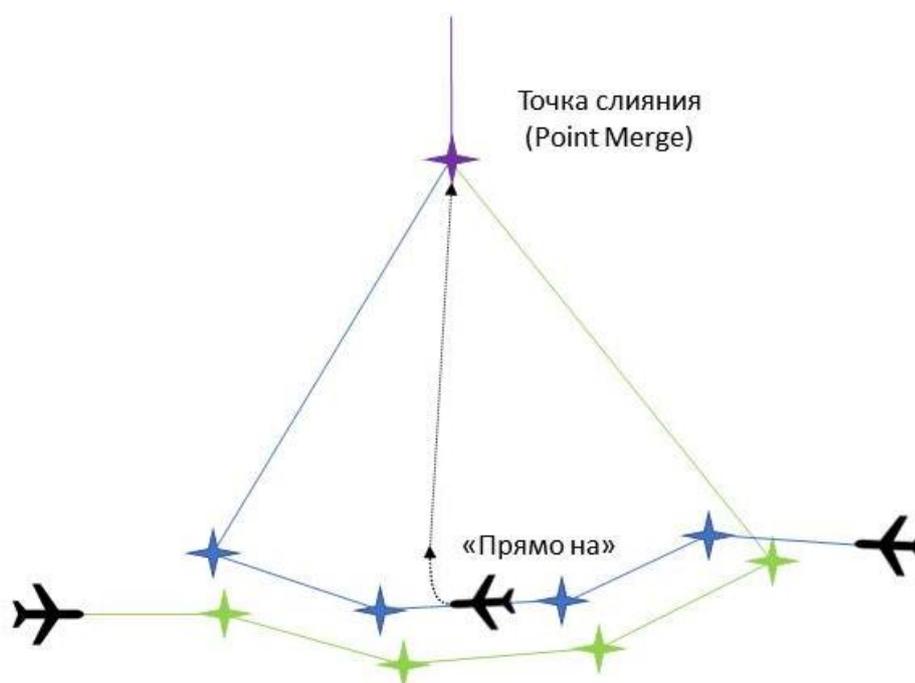


Рисунок 1.11 – Отворот ВС с траектории задержки и следование на точку слияния (Point Merge)

В большинстве случаев для отворота ВС на точку слияния применяется процедура «Прямо на». Применение процедуры «Прямо на» предусматривает следование ВС на точку пути, принадлежащую текущему маршруту движения, минуя точки пути расположенные между текущим местоположением ВС и назначенной точкой.

Момент отворота на точку слияния (Point Merge), как правило, определяется в зависимости от расположения предшествующего ВС, с учетом потребного интервала на посадку.

Так как ВС, находясь на траектории задержки, выполняют полет по равноудаленной траектории относительно точки слияния, диспетчер УВД ориентируется не на расстояние между парой ВС, а на дистанцию, которое имеет предшествующее ВС относительно траектории задержки, на которой находится ВС ожидающее отворота на точку слияния (Point Merge). На рисунке 1.12 отражен основной принцип определения момента отворота на точку слияния при следовании по траектории задержки.

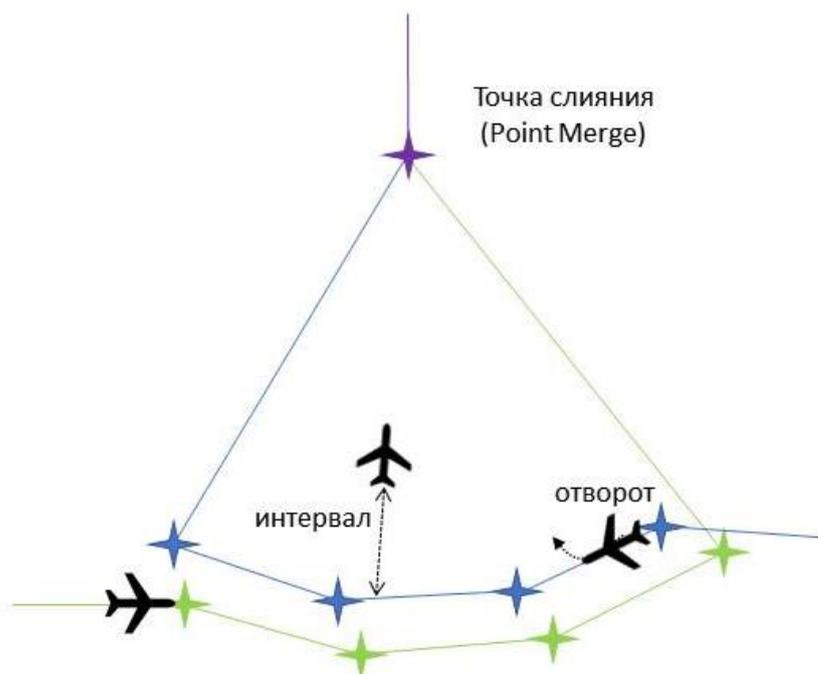


Рисунок 1.12 - Принцип определения момента отворота последующего ВС

Кроме формирования потока прибывающих на посадку ВС и формирования интервалов на посадку, системы слияния потоков могут использоваться и для других целей:

- реализации задержки при кратковременном закрытии ВПП, например, при необходимости осмотра ВПП, либо изменении рабочего направления ВПП;
- создания интервала для вылетающих ВС, в случае использования смешанных операций на одной ВПП;
- изменения очередности захода ВС в зависимости от приоритета, например для обеспечения внеочередной посадки ВС, объявившего сигнал срочности.

С учетом необходимости эшелонирования ВС и обеспечения следования на разных эшелонах полета, в системах слияния потоков, имеющих полное взаимное перекрытие траекторий задержки, высоты на точках пути траекторий задержки публикуются на картах стандартных маршрутов прибытия. Таким образом, для каждой конкретной траектории назначается один, фиксированный эшелон.

При использовании фиксированных эшелонов на траектории задержки системы слияния потоков предполагается, что воздушные суда выполняют полет по траектории задержки, как правило, без снижения. На каждой из траекторий задержки используется только один эшелон. Эшелоны следования выбираются в зависимости от удаленности траектории задержки от точки слияния. Воздушные суда попадают на траекторию задержки через фиксированные точки входа (Entry Points). Для каждой траектории задержки существует только одна точка входа. Интервал для следования на одном эшелоне по траектории задержки должен учитывать возможность сокращения расстояния между ВС, за счет влияния ветра, наличия разворотов и непосредственно выполнения маневра разворота на точку слияния. Продольный интервал следования по траектории задержки на одном эшелоне должен превышать норму эшелонирования.

Для примера на рисунке 1.13 приведена карта стандартных маршрутов прибытия на ВПП 28 аэродрома Дублин (EIDW). Как видно из карты, в данной системе Point Merge существует две точки входа. Северная точка входа KERAV имеет фиксированный эшелон входа 80, южная точка входа SIVNA имеет

фиксированный эшелон входа 70. Конечные точки траектории задержки DW816 и DW706 имеют, соответственно такие же эшелоны полета: 80 и 70.

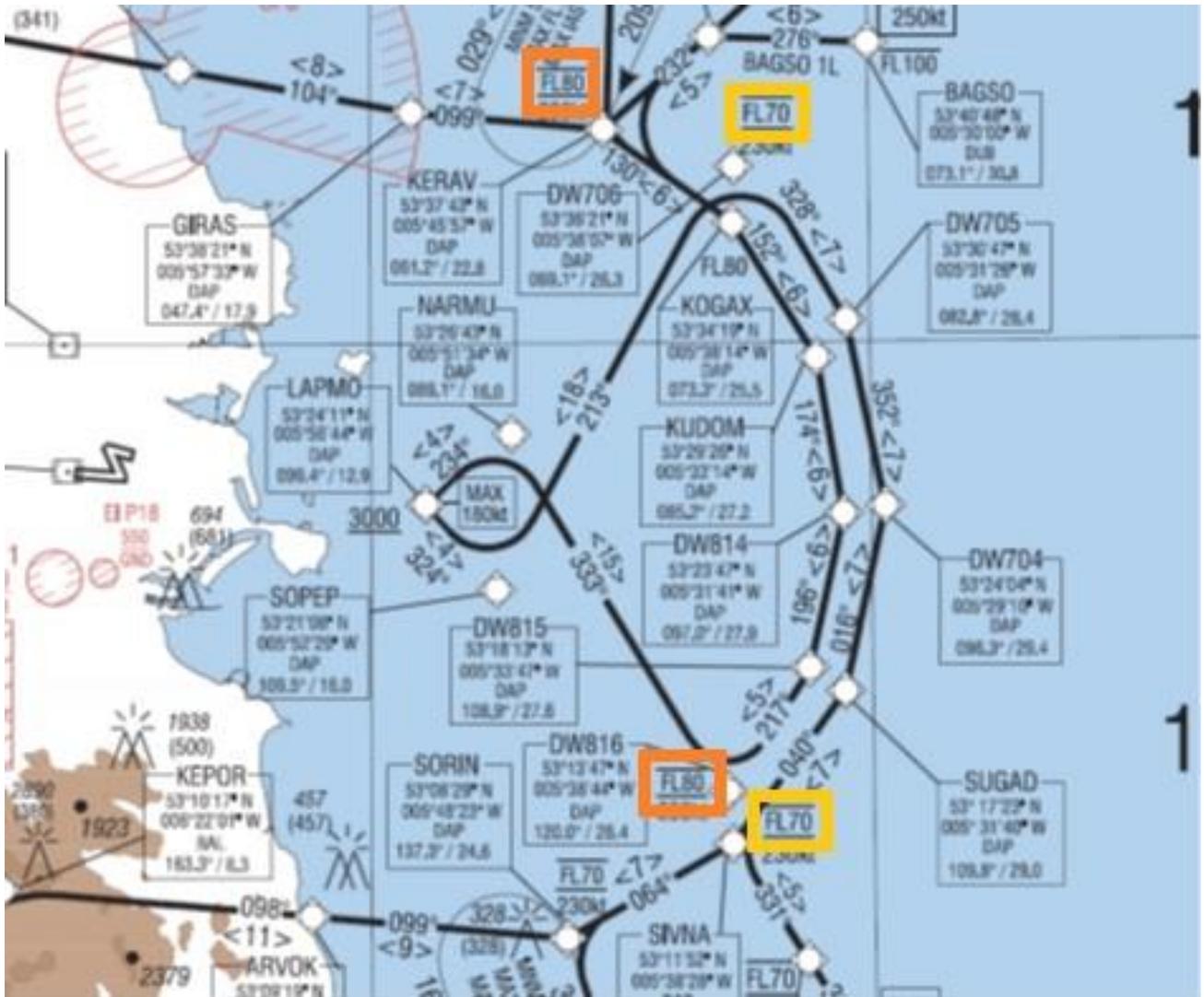


Рисунок 1.13 – Карта системы Point Merge аэропорта Дублин (EIDW)

Таким образом, воздушные суда, проходящие через одну из точек входа, должны быть эшелонированы на соответствующую величину горизонтального интервала. Величина горизонтального интервала зависит от применяемых минимальных интервалов горизонтального эшелонирования и пропускной способности ВПП аэродрома, с учетом возможного сокращения интервала при выполнении разворотов по траектории (рисунок 1.14).

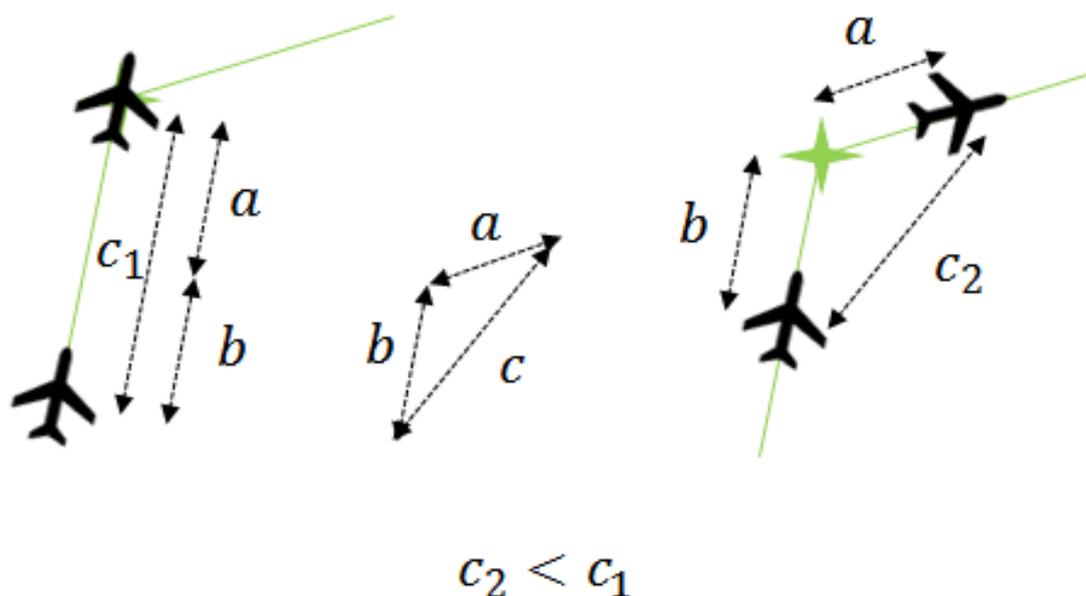


Рисунок 1.14 – Сокращение горизонтального интервала между ВС при выполнении разворотов

Вход на точку входа траектории задержки, как правило, обеспечивается диспетчерским пунктом подхода (ДПП), соответственно, горизонтальный интервал входа должен быть не менее норм эшелонирования применяемых при диспетчерском обслуживании подхода. Для выполнения этого условия диспетчер, отвечающий за выход воздушных судов в точку входа, обеспечивает соответствующее горизонтальное эшелонирование до входной точки применением векторения, регулирования скорости и задержки воздушных судов в зонах ожидания. Для того чтобы потоки воздушных судов, проходящих через  $n$  точек входа позволяли создать единый поток воздушных судов, соответствующий применяемым интервалам на посадку, необходимо, чтобы горизонтальные интервалы на соответствующие точки входа были как минимум в  $n$  раз больше интервала на посадку. Процесс слияния двух равномерных потоков (западного и восточного направления) прибывающих судов показан на рисунке 1.15

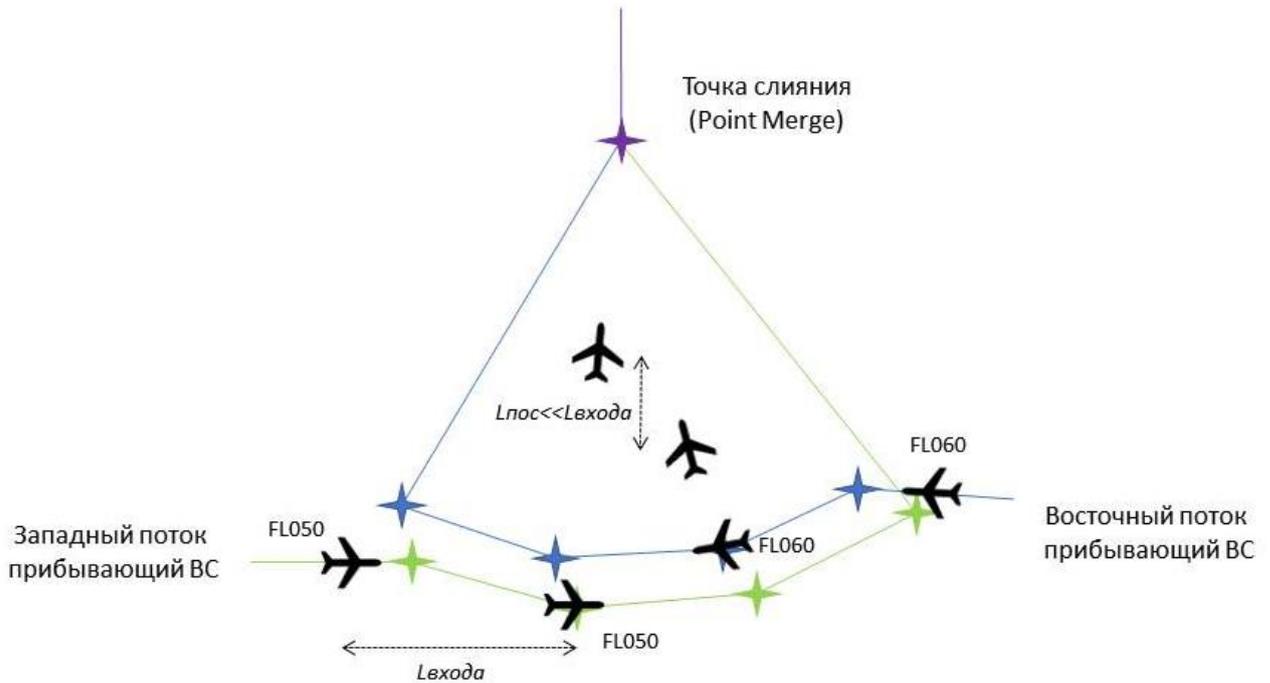


Рисунок 1.15 – Формирование единого потока прибывающих ВС

Рассмотрим приведенный пример системы слияния потоков с двумя точками входа. Предположим, что выход воздушных судов на точки входа обеспечивается ДПП, осуществляющим диспетчерское обслуживание подхода, а ОВД после пролета входных точек обеспечивается диспетчером диспетчерского пункта круга (ДПК), осуществляющим аэродромное диспетчерское обслуживание. Для упрощения расчетов пренебрежём иными потерями горизонтального интервала (потери на разворот, ветер, и др.). Кроме того, не будем принимать во внимание, что минимальные безопасные интервалы при диспетчерском обслуживании подхода больше, чем при аэродромном диспетчерском обслуживании [68]. В этом случае задача диспетчера ДПП будет состоять в выдерживании допустимых горизонтальных интервалов на точку входа между двумя заходящими на посадку ВС, на одном эшелоне следования. Выдерживаемые диспетчером ДПП горизонтальные интервалы должны быть не менее безопасных интервалов эшелонирования, с учетом допустимых интервалов на посадку, кроме того, интервалы будут зависеть от количества точек входа. Допустимый горизонтальный интервал на точку входа может быть вычислен по формуле, разработанной в ходе диссертационного исследования [26]:

$$L_{\text{входа}} = L_{\text{пос}} * m, \quad (1.1)$$

где  $L_{\text{входа}}$  – допустимый горизонтальный интервал на точку входа;

$L_{\text{пос}}$  – допустимый интервал на посадку, при котором гарантируется освобождение ВПП воздушным судном, следующим впереди;

$m$  – количество точек входа.

Допустимые горизонтальные интервалы на точку входа должны быть увеличены как минимум вдвое по сравнению с допустимым интервалом на посадку, так как используется слияние двух потоков воздушного движения  $m = 2$ . Как правило, конкретные заданные интервалы, создаваемые диспетчером, отвечающим за выход воздушных судов в точку входа, оговариваются в локальных инструкциях.

Таким образом, для эффективной работоспособности системы слияния потоков, при использовании траекторий задержки с полным взаимным перекрытием, необходимо, чтобы поток прибывающих ВС был равномерно распределен между точками входа. При равномерном распределении потока прибывающих воздушных судов между точками входа достигается максимальная эффективность создания интервалов на посадку. В этом случае, диспетчер, создающий интервалы на посадку, всегда будет иметь достаточное количество воздушных судов для создания единого потока, с учетом применяемого интервала на посадку.

Однако, в случае отсутствия потока с противоположной точки входа фактический интервал на посадку, который может быть создан диспетчером круга  $L_{\text{посфакт}}$  будет не менее  $L_{\text{входа}}$ , таким образом, следуя (1.1)

$$L_{\text{посфакт}} \geq L_{\text{входа}} = L_{\text{пос}} * 2 \quad (1.2)$$

В результате будет происходить потеря эффективности аэронавигационного обеспечения, так как интервалы, создаваемые диспетчером подхода в целях использования системы слияния потоков, окажутся избыточными. В традиционных системах слияния потоков для обеспечения равномерности

потоков прибывающих ВС по точкам прибытия применяется перенаправление части потока прибывающих ВС на другое направление прибытия. При этом перенаправленные на другое направление ВС, пролетают дополнительное расстояние  $L_{изб}$ . Пример перенаправления ВС на другое направление показан на рисунке 1.16.

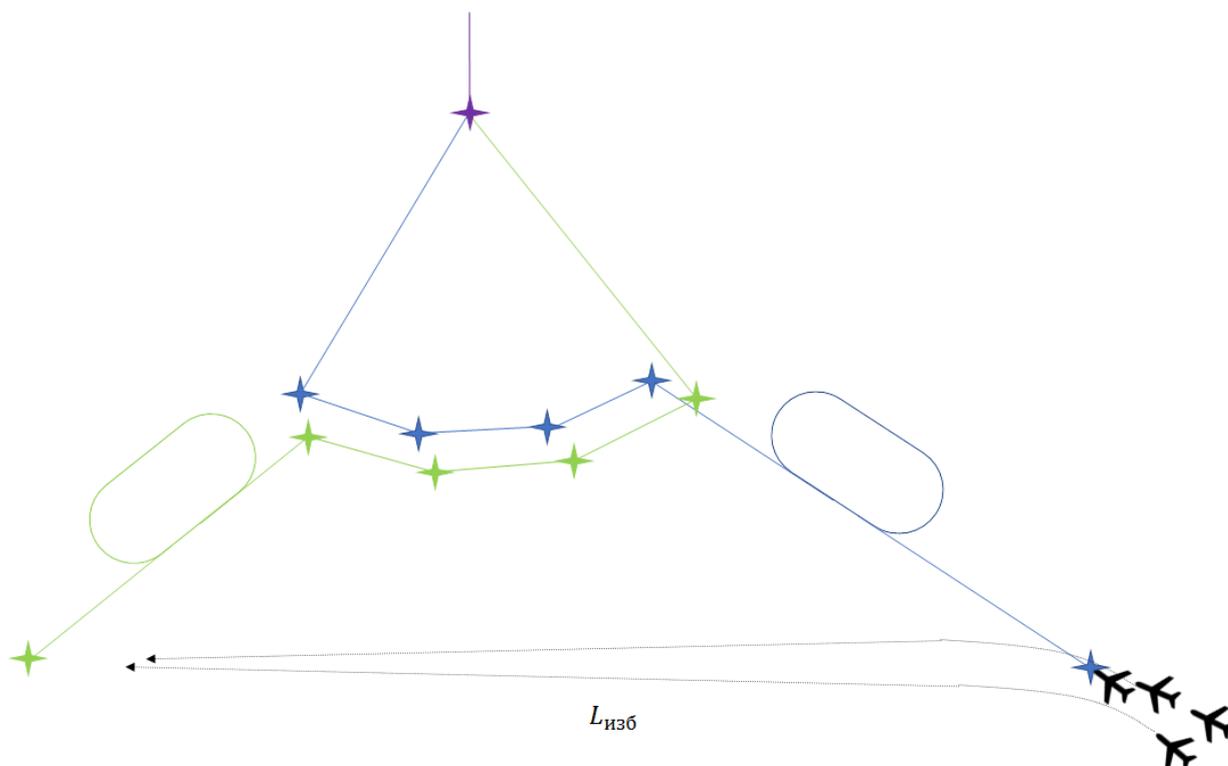


Рисунок 1.16 – Перенаправление потока ВС на другое направление прибытия

### 1.3. Характеристики потоков воздушного движения прибывающих воздушных судов на аэродромах, где применяются системы слияния потоков

В некоторых аэропортах, использующих систему слияния потоков, потоки прибывающих ВС между точками входа распределены достаточно равномерно, ввиду географического расположения самого аэропорта. Воздушное движение в течение большей части времени позволяет диспетчерам ДПП сформировать равные потоки на точки входа системы слияния потоков. Однако существуют аэропорты, в которых, поток воздушных судов прибывает преимущественно на одну точку входа или потоки воздушных судов на точки входа не совпадают по времени, что приводит к поочередной загрузке точек входа.

Так, исходя из анализа статистических данных о прибывающих ВС на аэродромы Санкт-Петербург (Пулково), Екатеринбург (Кольцово), Новосибирск (Толмачёво) и Калининград (Храброво) определено, что потоки прибывающих с разных направлений ВС оказываются не одинаковыми и неравномерными.

Актуальное на данный момент распределение ВС по точкам входа на траекторию задержки на аэродромах Санкт-Петербург (Пулково), Екатеринбург (Кольцово), Новосибирск (Толмачёво) и Калининград (Храброво) представлено в таблицах 1.1 – 1.4 и на рисунках 1.17 – 1.20

Таблица 1.1 – Распределение прибывающих ВС по часам суток в зависимости от направления прибытия за 14 июля 2023 года аэродром Санкт-Петербург (Пулково)

Час, УТЦ	Южная точка входа	Северная точка входа	Общее ко-во ВС
00	2	0	2
01	2	1	3
02	0	4	4
03	5	8	13
04	3	7	10
05	3	7	10
06	8	5	13
07	5	4	9
08	11	4	15
09	5	9	14
10	9	8	17
11	8	4	12
12	8	2	10
13	11	5	16
14	9	3	12
15	12	7	19
16	8	4	12
17	14	2	16
18	10	6	16
19	12	3	15
20	8	6	14
21	7	3	10
22	5	0	5
23	3	2	5
Итого	168	104	272

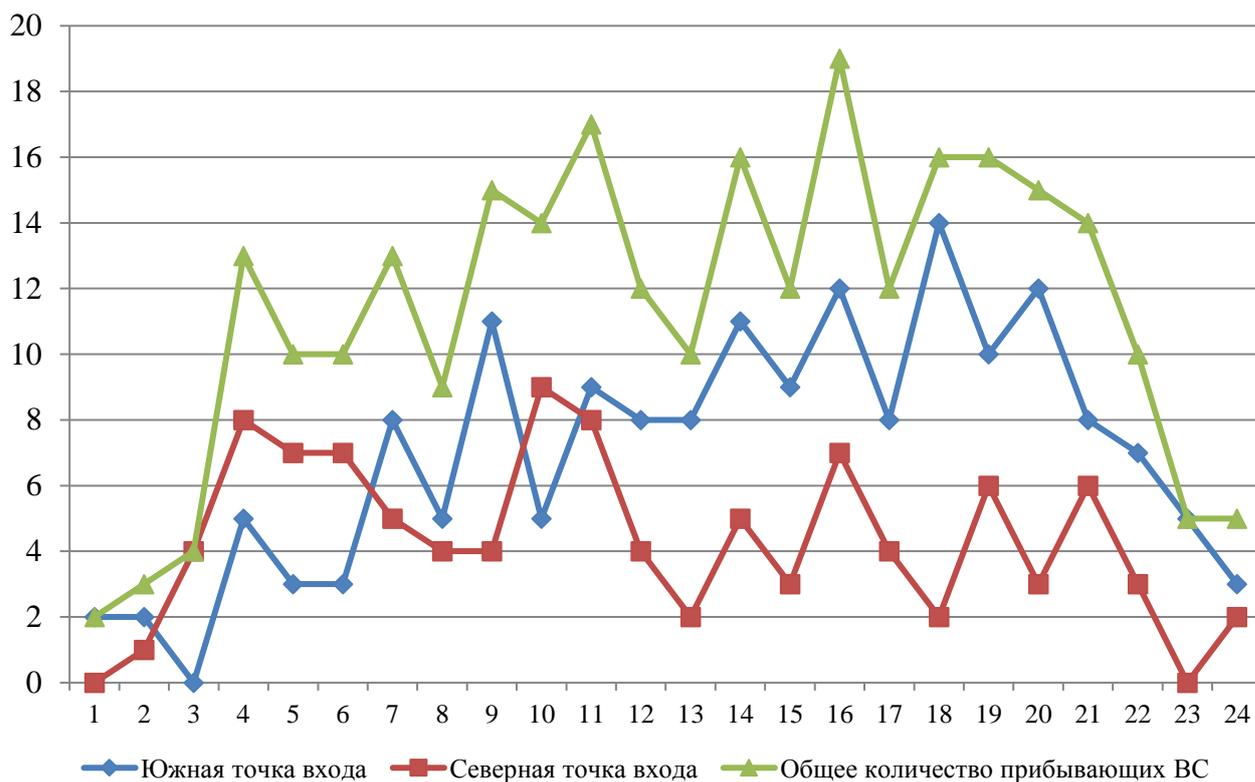


Рисунок 1.17 – График распределения прибывающих ВС по точкам входа в зависимости от часа суток, аэродром Санкт-Петербург (Пулков)

Таблица 1.2 – Распределение прибывающих ВС по часам суток в зависимости от направления прибытия за 14 июля 2023 года аэродром Екатеринбург (Кольцово)

Час, УТЦ	Южная точка входа	Северная точка входа	Общее Кол-во ВС
00	2	2	4
01	2	0	2
02	0	0	0
03	1	1	2
04	3	3	6
05	1	1	2
06	0	3	3
07	4	2	6
08	4	1	5
09	3	1	4
10	3	3	6
11	3	2	5
12	4	0	4
13	1	4	5

Час, УТЦ	Южная точка входа	Северная точка входа	Общее ко-во ВС
14	3	1	4
15	0	2	2
16	3	2	5
17	4	2	6
18	4	0	4
19	5	0	5
20	5	1	6
21	2	0	2
22	5	1	6
23	7	2	9
Итого	69	34	103

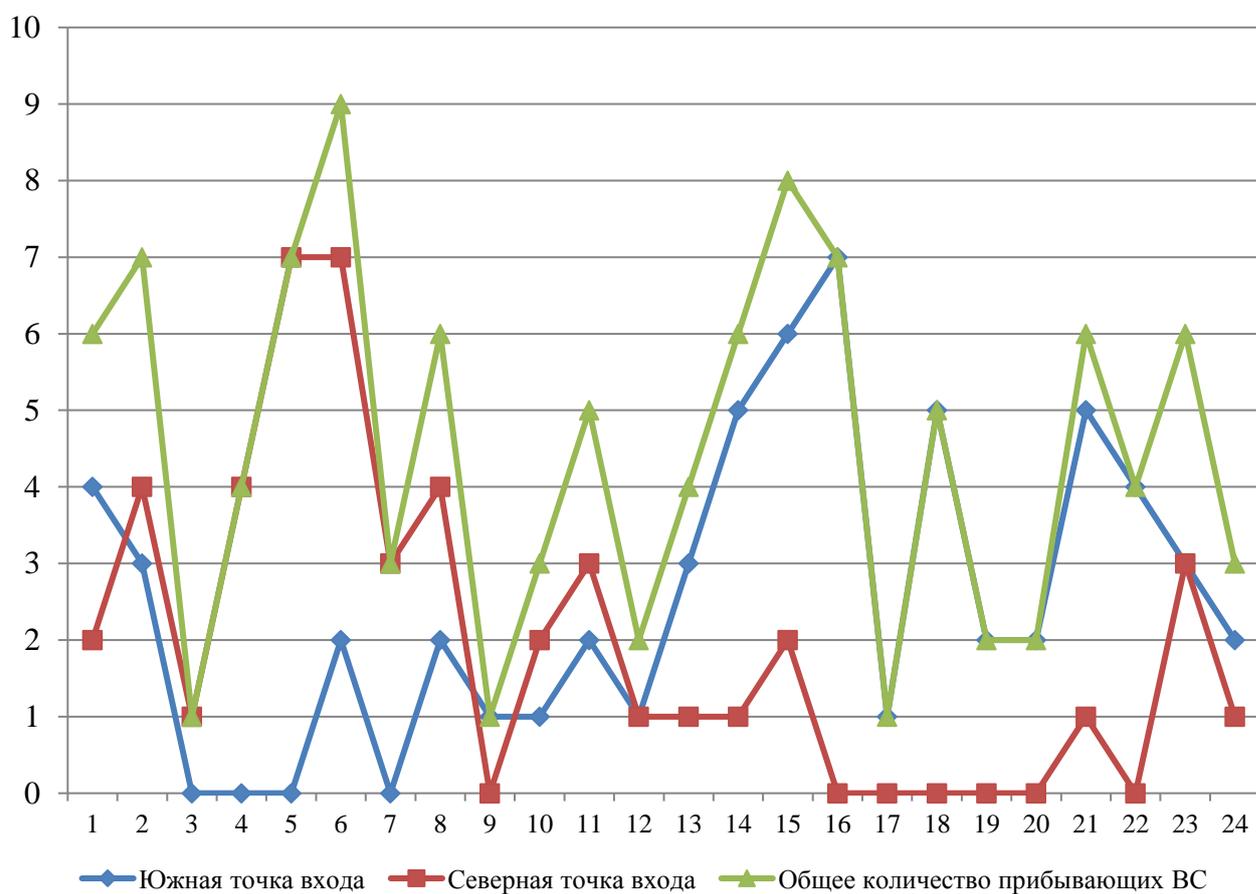


Рисунок 1.18 – График распределения прибывающих ВС по точкам входа в зависимости по часам суток, аэродром Екатеринбург (Кольцово)

Таблица 1.3 – Распределение прибывающих ВС по часам суток в зависимости от направления прибытия за 14 июля 2023 года аэродром Новосибирск (Толмачево)

Час, УТЦ	Южная – западная точка входа	Северная – восточная точка входа	Общее Кол-во ВС
00	4	2	6
01	3	4	7
02	0	1	1
03	0	4	4
04	0	7	7
05	2	7	9
06	0	3	3
07	2	4	6
08	1	0	1
09	1	2	3
10	2	3	5
11	1	1	2
12	3	1	4
13	5	1	6
14	6	2	8
15	7	0	7
16	1	0	1
17	5	0	5
18	2	0	2
19	2	0	2
20	5	1	6
21	4	0	4
22	3	3	6
23	2	1	3
Итого	61	47	108

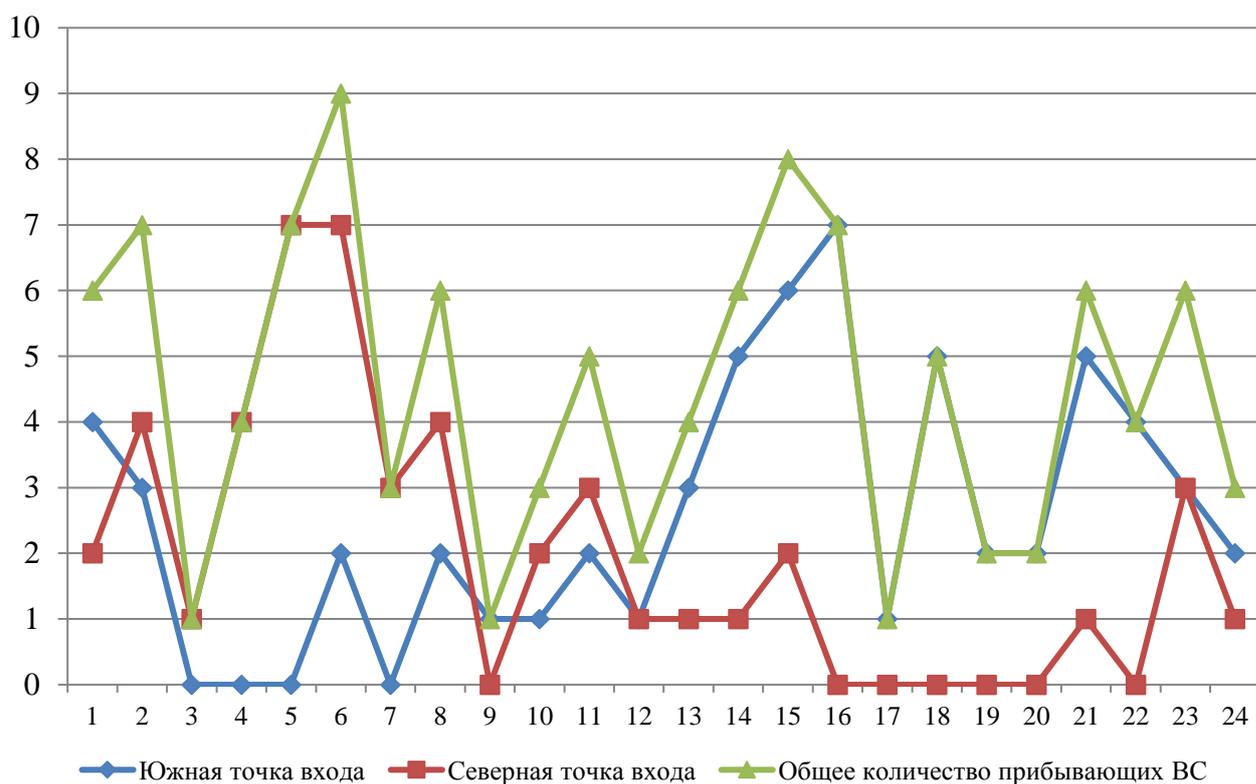


Рисунок 1.19 – График распределения прибывающих ВС по точкам входа в зависимости по часам суток, аэропорт Новосибирск (Толмачево)

Таблица 1.4 – Распределение прибывающих ВС по часам суток в зависимости от направления прибытия за 14 июля 2023 года аэропорт Калининград (Храброво)

Час, УТЦ	Южная точка входа	Северная точка входа	Общее Кол-во ВС
00	0	1	1
01	0	0	0
02	0	0	0
03	0	0	0
04	0	0	0
05	0	1	1
06	0	3	3
07	1	3	4
08	0	6	6
09	0	5	5
10	0	2	2
11	0	3	3
12	0	3	3
13	0	5	5

Час, УТЦ	Южная точка входа	Северная точка входа	Общее Кол-во ВС
14	0	3	3
15	0	1	1
16	0	4	4
17	0	4	4
18	0	2	2
19	0	3	3
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	1	1
Итого	1	50	51

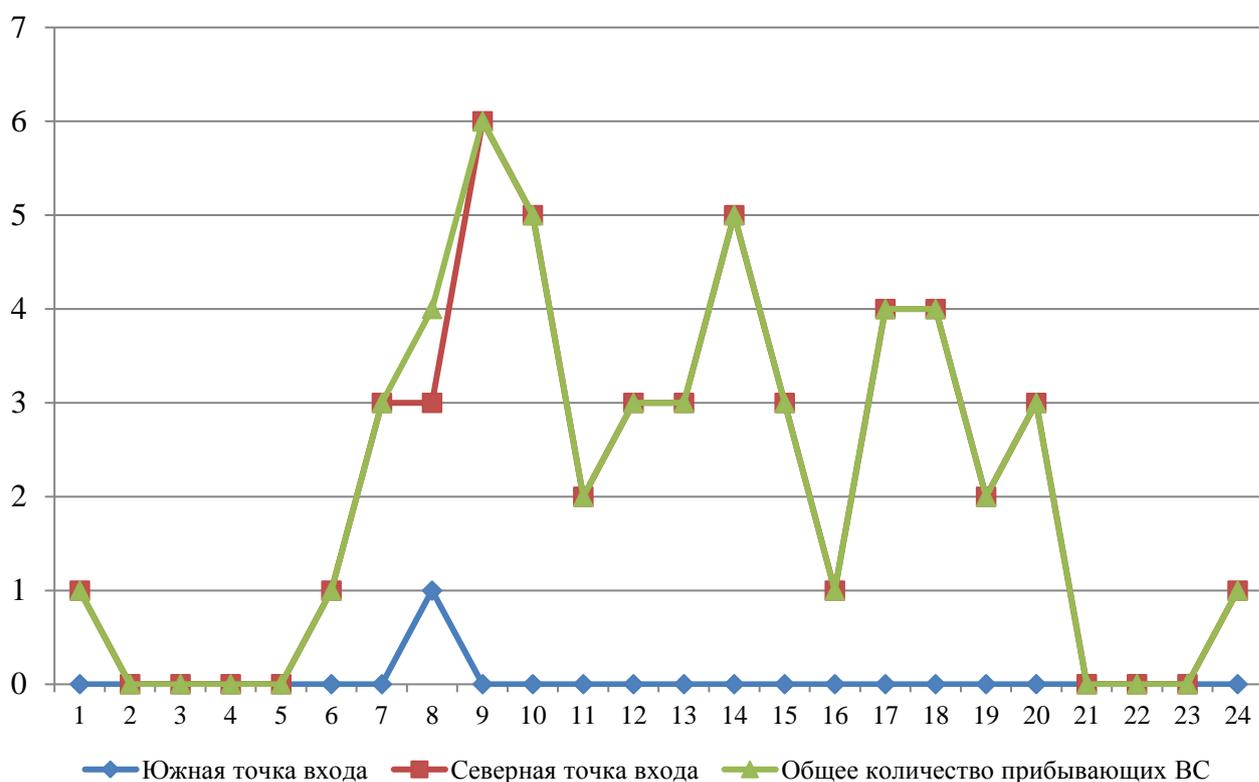


Рисунок 1.20 – График распределения прибывающих ВС по точкам входа в зависимости по часам суток, аэродром Калининград (Храброво)

Таким образом, можно заключить, что большую часть времени поток прибывающих ВС имеет неравномерное распределение по направлению прибытий. В результате могут возникать ситуации, при которых формирование

единого потока прибывающих ВС с использованием двух точек входа невозможно, так как весь поток прибывающих ВС будет следовать только через одну точку входа.

В таком случае потребуются иной технологических процесс с целью сохранения эффективности аэронавигационного обслуживания при формировании единого потока заходящих на посадку ВС, в условиях неравномерного распределения прибывающих ВС на точки входа.

### Выводы по главе 1

1. Традиционные методы организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием маршрута прибытия (STAR) и зон ожидания имеют существенные недостатки, в одном случае связанные с низкой точностью формирования интервала и избыточной задержкой, а в другом случае – с высокой загруженностью диспетчера УВД.

2. Использование традиционной системы слияния потоков при организации воздушного движения прибывающих ВС при условии равномерного распределения прибывающих ВС по точкам входа, позволяет организовать воздушное движение прибывающих ВС с высокой эффективностью. Однако в случае неравномерного распределения прибывающих ВС по точкам входа использование данного метода организации воздушного движения прибывающих ВС приводит к формированию избыточных интервалов на посадку. Таким образом, образуется простой.

3. На основании проведенного анализа системы слияния потоков ВС установлено, что наибольшую популярность имеет расположение траекторий в створе ВПП, так как это позволяет наиболее качественно учитывать ветровой режим и управлять распределением внимания диспетчера УВД. Такое расположение траекторий задержки применяется в аэропортах, имеющих достаточное количество свободного воздушного пространства. Точки слияния

Point Merge в таких системах являются контрольными и располагаются на продолжении посадочной прямой.

4. Для формирования единого потока прибывающих ВС и эффективности ССП необходимо чтобы поток ВС был равномерно распределен между точками входа. В традиционной ССП для этого используют перенаправление части потоков ВС на другие направления, в результате перенаправленные воздушные суда проходят дополнительное расстояние, что приводит к дополнительной задержке ВС.

5. Анализ распределения потоков прибывающих ВС по точкам входа и времени суток на траектории задержки по аэропортам Санкт-Петербург (Пулково), Екатеринбург (Кольцово), Новосибирск (Толмачево), Калининград (Храброво) показал, что большую часть времени потоки имеют неравномерное прибытие. Это приводит к невозможности формирования единого потока пребывания ВС с использованием двух точек входа.

Таким образом, требуется разработка модели, позволяющей оценить возможности применения систем слияния потоков в условиях различного распределения потоков прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки и выработка предложений позволяющих нивелировать недостаток традиционных систем слияния потоков.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

### 2.1. Модель традиционной системы слияния потоков

Работу традиционной системы слияния потоков при равномерном и неравномерном распределении потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки можно представить с помощью временных диаграмм (рисунок 2.1). Элементы временной диаграммы на схеме системы слияния потоков представлены на рисунке 2.2.

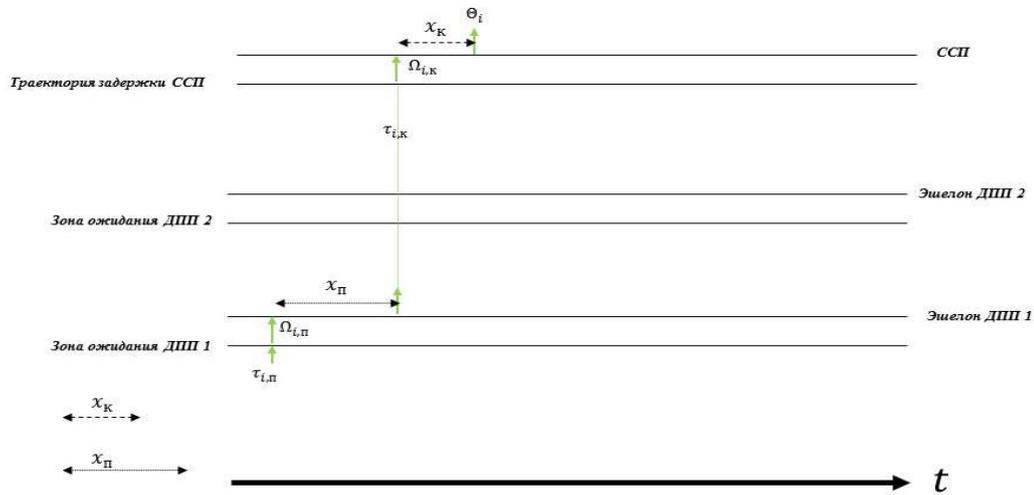


Рисунок 2.1 – Временная диаграмма

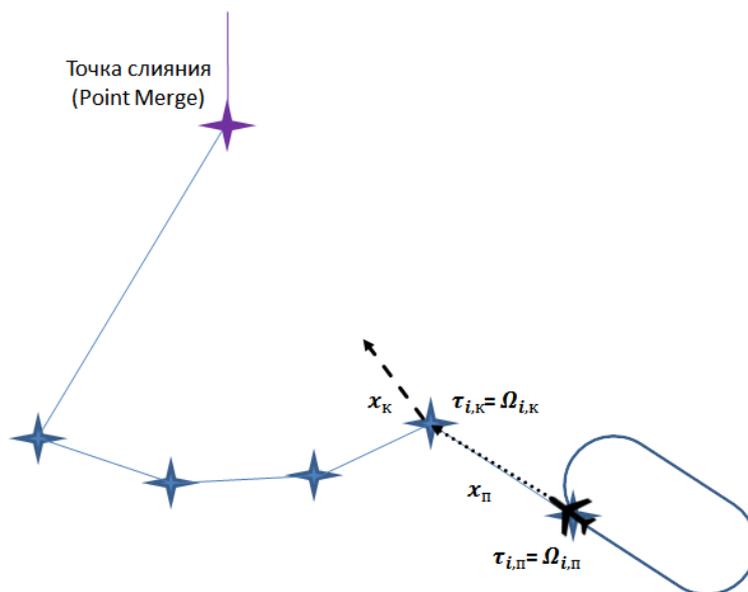


Рисунок 2.2 – Элементы временной диаграммы на схеме системы слияния потоков

На представленной диаграмме  $i$ -е ВС первоначально попадает в зону ожидания (зона ожидания ДПП 1 или ДПП 2). Время прибытия в зону ожидания обозначено, как  $\tau_{i,п}$ . ВС поступает на точку выхода из зоны ожидания тогда, когда имеется необходимый продольный интервал с расположенным впереди ВС. Если задержка в зоне ожидания не требуется, ВС сразу же попадает на участок между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, время поступления на данный участок обозначается как  $\Omega_{i,п}$ , соответственно интервал, с которым следующее ВС может выйти на этот участок обозначен как  $x_{i,п}$ . После окончания полета по данному участку ВС попадает на траекторию задержки системы слияния потоков. Время пролета точки входа на траекторию задержки обозначено как  $\tau_{i,к}$ . ВС может выполнить отворот с траектории задержки, когда интервал с предыдущим ВС уже сформирован. Если задержка на траектории задержки не требуется, ВС сразу же следует к точке слияния. Время отворота с траектории задержки по направлению к точке слияния обозначено как  $\Omega_{i,к}$ , время завершения формирования интервала на посадку обозначено как  $\Theta_i$ , соответственно интервал, с которым ВС последовательно могут выполнять отворот с траектории задержки обозначен как  $x_{i,к}$ .

Зоны ожидания и участки полета между точками выхода из зоны ожидания и точками входа на траекторию задержки располагаются на диспетчерском пункте подхода, где применяется норма эшелонирования [68] соответствующая  $L_{доп} = 10$  км. В результате разворота при полете по траектории задержки возникает сокращение горизонтального интервала. Для предотвращения уменьшения горизонтального интервала при выполнении разворотов, диспетчером УВД формируется больший горизонтальный интервал. Так, при угле разворота на траектории, составляющем 90 градусов, фактически должен применяться интервал соответствующий как минимум  $L_{ТЗ} = 14,2$  км, что позволит, при непосредственном выполнении разворота не допустить сокращение интервала между последующими ВС на значение менее  $L_{доп} = 10$  км.

Тогда, время  $\chi_{\text{п}}$ , которое требуется для формирования интервала  $L_{\text{тз}}$ , с учетом скорости полета, соответствующей оптимальной скорости ожидания можно найти по формуле:

$$\chi_{\text{п}} = \frac{L_{\text{тз}}}{W_{\text{тз}}} \quad (2.1)$$

Тогда, при  $W_{\text{тз}} = 400 \frac{\text{км}}{\text{час}}$ ,  $L_{\text{тз}} = 14,2$  км,  $\chi_{\text{п}}$  составит:

$$\chi_{\text{п}} = \frac{L_{\text{тз}}}{W_{\text{тз}}} = \frac{14,2}{400} = 2,13 \text{ мин}$$

Время  $\chi_{\text{п}}$ , фактически представляет собой минимальный временной интервал, используемый диспетчером при выводе ВС из зоны ожидания для следования на одном эшелоне.

Формирование интервалов непосредственно на посадку производится с помощью отворота с траектории задержки. Непосредственно выход на посадочную прямую производится на диспетчерском пункте круга, где применяется интервал эшелонирования при аэродромном диспетчерском обслуживании  $L_{\text{адо}} = 5$  км. Данный интервал должен быть сохранен до момента непосредственно посадки ВС. Таким образом можно определить время,  $\chi_{\text{к}}$ , которое будет выражать временной интервал между последовательно выполняющими посадку ВС.  $\chi_{\text{к}}$  будет зависеть от скорости движения последующего ВС при полете по глиссаде со скоростью  $W_{\text{глисс}}$ . Найдем  $\chi_{\text{к}}$  по формуле:

$$\chi_{\text{к}} = \frac{L_{\text{адо}}}{W_{\text{глисс}}} \quad (2.2)$$

Тогда, при  $W_{\text{глисс}} = 240$  км/час,  $L_{\text{адо}} = 5$  км, временной интервал между последовательными посадками ВС составит:

$$\chi_{\text{к}} = \frac{L_{\text{адо}}}{W_{\text{глисс}}} = \frac{5}{240} = 1,25 \text{ мин}$$

Таким образом,  $\chi_{\text{п}} \gg \chi_{\text{к}}$ , однако, когда прибывающие ВС равномерно прибывают в каждую из зон ожидания, удастся организовать очередь прибывающих ВС с временным интервалом, соответствующим  $\chi_{\text{к}}$ .

На рисунке 2.3 представлена временная диаграмма, в которой показана работа традиционной системы слияния потоков в условиях полностью равномерного распределения прибывающих ВС по направлению прибытий.

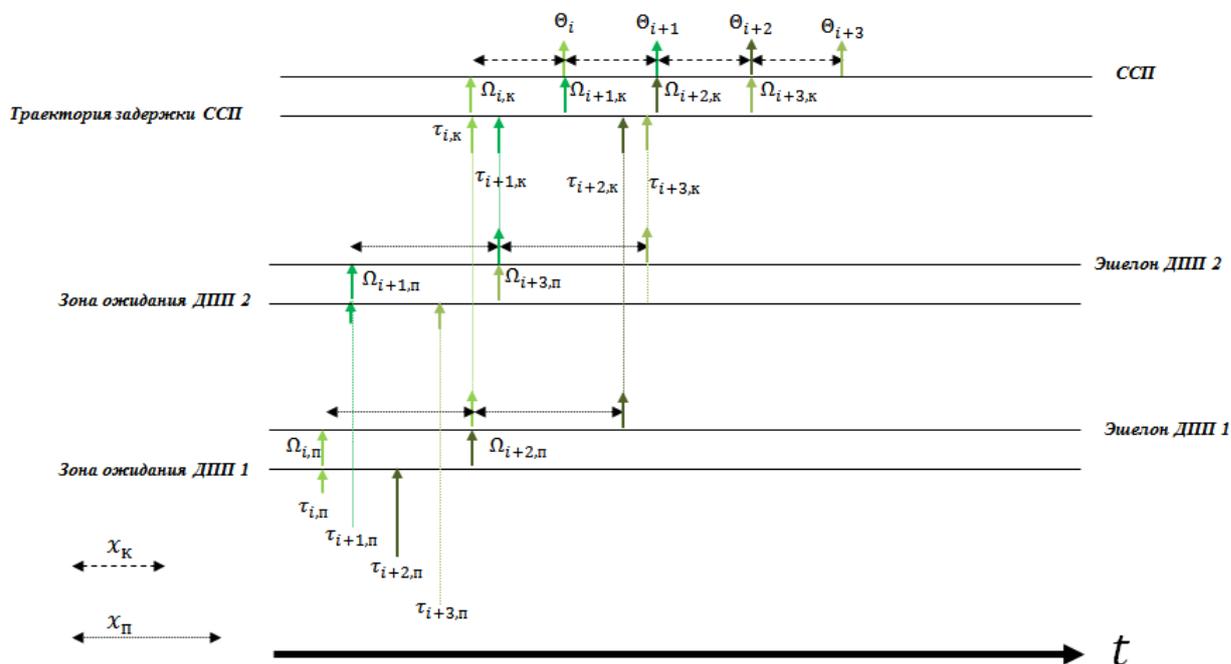


Рисунок 2.3 – Работа традиционной системы слияния потоков при равномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки

ВС  $i, i+1, i+2, i+3$ , поступают в зоны ожидания ДПП с некоторой разницей по времени  $\chi_{i,i+2} = \tau_{i+2,п} - \tau_{i,п}$ ,  $\chi_{i+1,i+3} = \tau_{i+3,п} - \tau_{i+1,п}$  меньшей, чем  $\chi_п$  и  $\chi_к$ . При этом ВС  $i$  и ВС  $i+2$  поступают в зону ожидания ДПП 1, а ВС  $i+1$  и ВС  $i+3$  в зону ожидания ДПП 2.

Так как других ВС в зоне ожидания ДПП 1 перед ВС  $i$  нет, ВС  $i$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i,п} = \tau_{i,п}$ .

Аналогично ситуация развивается с ВС  $i+1$  в зоне ожидания ДПП 2,  $\Omega_{i+1,п} = \tau_{i+1,п}$ .

ВС  $i+2$  попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, в результате ВС  $i+2$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i+2,п} = \tau_{i,п} + \chi_п$ .

ВС  $i+3$ , попадает в зону ожидания ДПП 2, когда ВС  $i+1$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, в результате ВС  $i+3$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i+3,п} = \tau_{i+1,п} + \chi_{п}$ .

ВС  $i$  прибывает на траекторию задержки во время  $\tau_{i,к} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$  и застаёт траекторию задержки свободной, в результате ВС  $i$  сразу направляется на точку слияния  $\Omega_{i,к} = \tau_{i,к} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$ , тогда время  $\Theta_i = \Omega_{i,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ .

ВС  $i+1$  выходит на траекторию задержки с иного направления (на другом эшелоне), во время  $\tau_{i+1,к} = \tau_{i+1,п} + \chi_{п}$ , однако интервал на посадку за ВС  $i$  еще не сформирован, соответственно ВС  $i+1$  выполняет полет по траектории задержки, до момента  $\Omega_{i+1,к} = \Theta_i = \Omega_{i,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ . В результате время окончания формирования интервала для ВС  $i+1$  составит  $\Theta_{i+1} = \Omega_{i+1,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ .

ВС  $i+2$  выходит в точку выхода на траекторию задержки во время  $\tau_{i+2,п} = \Omega_{i+2,п} + \chi_{п} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{п} = \tau_{i,п} + 2\chi_{п}$ , в этот момент интервал за ВС  $i+1$  еще не сформирован, соответственно ВС  $i+2$  выполняет полет по траектории задержки, отворот на точку слияния будет возможен во время  $\Omega_{i+2,к} = \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ , тогда время завершения формирования интервала для ВС  $i+2$  составит  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к}$ .

ВС  $i+3$  выходит в точку выхода на траекторию задержки во время  $\tau_{i+3,п} = \Omega_{i+3,п} + \chi_{п} = \tau_{i+1,п} + \chi_{п} + \chi_{п} = \tau_{i+1,п} + 2\chi_{п}$ , в этот момент на траектории задержки находится ВС  $i+2$ , которое пока не выполняет отворот на точку слияния, так как ожидает формирования интервала за ВС  $i+1$ , соответственно ВС  $i+3$  выполняет полет по траектории задержки. Отворот ВС  $i+3$  с траектории задержки будет возможен во время  $\Omega_{i+3,к} = \Theta_{i+2} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к}$ , тогда время завершения формирования интервала для ВС  $i+3$  составит  $\Theta_{i+3} = \Omega_{i+3,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 4\chi_{к}$ .

В результате, время завершения формирования интервала для каждого ВС можно выразить для этой ситуации как:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 2\chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 3\chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 4\chi_{\text{к}} \end{cases} \quad (2.3)$$

Можно сделать вывод, что время окончания формирования интервала для каждого из поступивших ВС будет различаться только на интервал  $\chi_{\text{к}}$ . Можно заключить, что равномерное прибытие ВС позволяет проводить их обслуживание на траекториях задержки системы слияния потоков без временных потерь. Таким образом, данный метод позволяет организовать воздушное движение прибывающих ВС с высокой эффективностью.

Представим ситуацию, в которой ВС прибывают только с одного направления. Работы традиционной системы слияния потоков в этом случае представлено на рисунке 2.4.

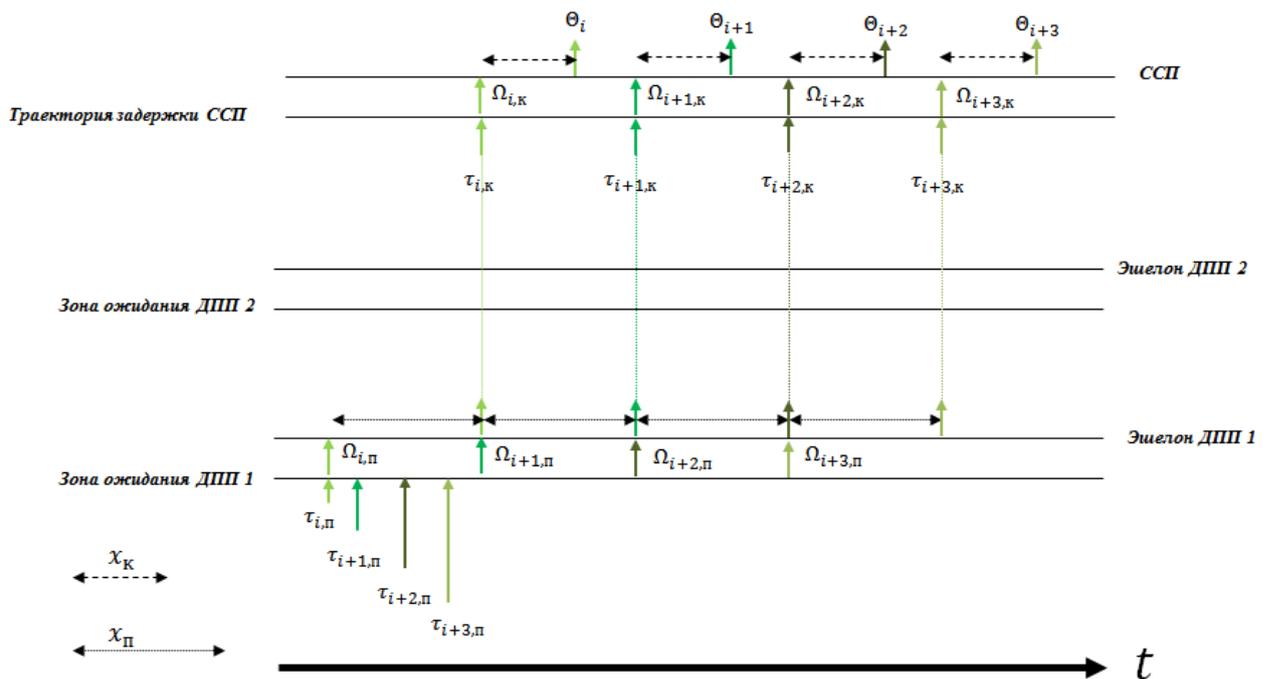


Рисунок 2.4 – Работа традиционной системы слияния потоков при неравномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки

ВС  $i, i+1, i+2, i+3$ , поступают в зоны ожидания ДПП с некоторой разницей по времени, меньшей, чем  $\chi_{\text{п}}$  и  $\chi_{\text{к}}$ . При этом все ВС поступают в зону ожидания ДПП 1. Так как других ВС в зоне ожидания ДПП 1 перед ВС  $i$  нет, ВС  $i$  сразу же

поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i,\text{п}} = \tau_{i,\text{п}}$ . ВС  $i+1$  попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, в результате ВС  $i+1$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i+1,\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$ . Соответственно ВС  $i+2$  попадает в зону ожидания когда в ней уже находится ВС  $i+1$ , соответственно ВС  $i+2$  может выйти из зоны ожидания во время  $\Omega_{i+2,\text{п}} = \Omega_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}}$ . Аналогично ВС  $i+3$  попадает в зону ожидания, когда в ней уже находится ВС  $i+2$  и ВС  $i+2$ , время выхода из зоны ожидания будет определяться как  $\Omega_{i+3,\text{п}} = \Omega_{i+2,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + 3\chi_{\text{п}}$ .

ВС  $i$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков первым, во время  $\tau_{i,\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$  и имеет возможность следовать прямо на точку слияния, в результате  $\Omega_{i,\text{к}} = \tau_{i,\text{к}}$ , а время  $\Theta_i = \Omega_{i,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+1$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+1,\text{к}} = \Omega_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}}$  и имеет возможность сразу же следовать на точку слияния так как  $\Theta_i = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ ,  $\tau_{i+1,\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}}$ , а  $\chi_{\text{п}} \gg \chi_{\text{к}}$ . В результате время  $\Theta_{i+1} = \Omega_{i+1,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+2$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+2,\text{к}} = \Omega_{i+2,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + 3\chi_{\text{п}}$  и имеет возможность сразу же следовать на точку слияния  $\Omega_{i+2,\text{к}} = \tau_{i+2,\text{к}}$ , так как  $\Theta_{i+1} = \tau_{i,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ ,  $\tau_{i+2,\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 3\chi_{\text{п}}$ , а  $\chi_{\text{п}} \gg \chi_{\text{к}}$ . В результате время  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 3\chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+3$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+3,\text{к}} = \Omega_{i+3,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i,\text{п}} + 4\chi_{\text{п}}$  и имеет возможность сразу же следовать на точку слияния  $\Omega_{i+3,\text{к}} = \tau_{i+3,\text{к}}$ , так как  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 3\chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ ,  $\tau_{i+3,\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 4\chi_{\text{п}}$ , а  $\chi_{\text{п}} \gg \chi_{\text{к}}$ . В результате время  $\Theta_{i+3} = \Omega_{i+3,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + 4\chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ .

Таким образом, время завершения формирования интервала для каждого ВС можно выразить для этой ситуации как:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + \chi_{\text{К}} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,\Pi} + 2\chi_{\Pi} + \chi_{\text{К}} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,\Pi} + 3\chi_{\Pi} + \chi_{\text{К}} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,\Pi} + 4\chi_{\Pi} + \chi_{\text{К}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Можно сделать вывод, что время окончания формирования интервала для каждого из поступивших ВС будет различаться только на интервал  $\chi_{\Pi}$ . Интервал  $\chi_{\Pi} \gg \chi_{\text{К}}$ . Можно заключить, что неравномерное прибытие ВС не позволяет проводить их обслуживание на траекториях задержки системы слияния потоков без временных потерь. Таким образом, данный метод не позволяет организовать воздушное движение прибывающих ВС с высокой эффективностью и приводит к формированию избыточных интервалов на посадку. Фактически формируется простой.

Пример работы традиционной системы слияния потоков в этом случае представлен на рисунках 2.5 – 2.8

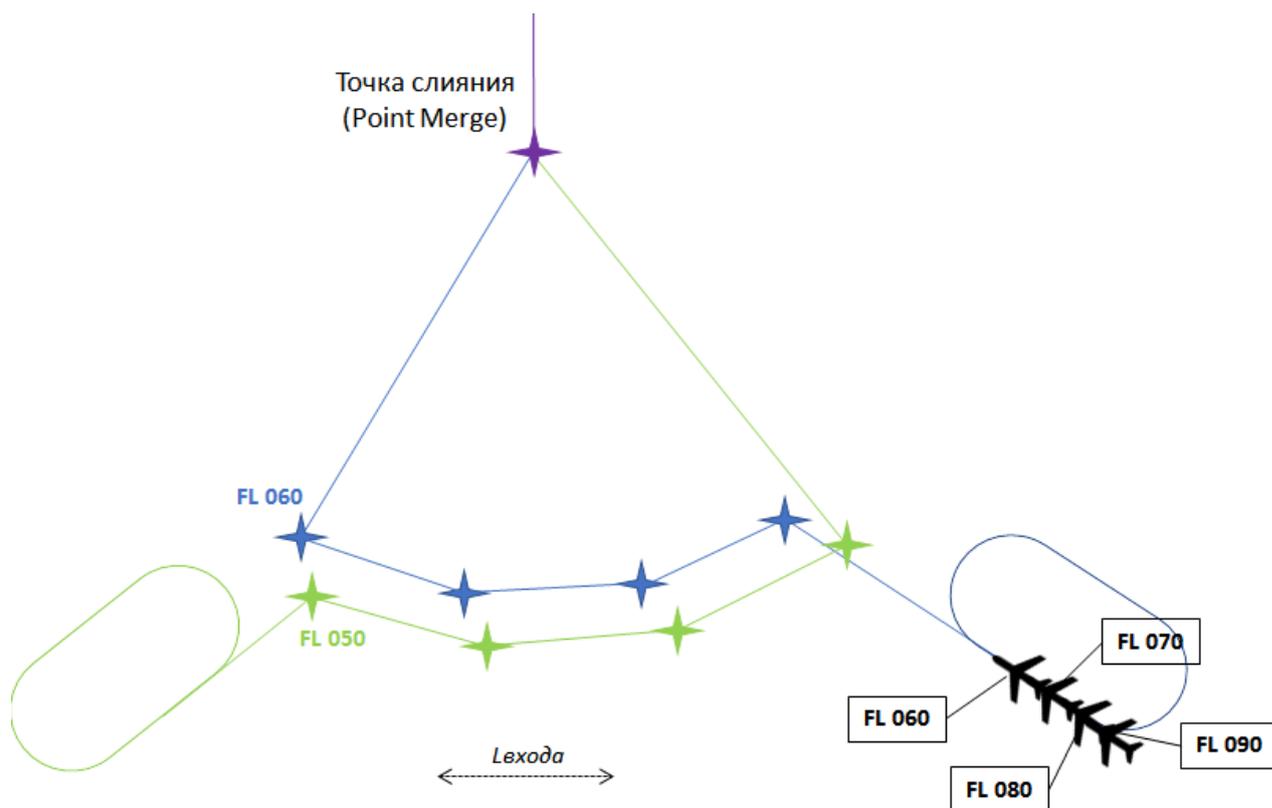


Рисунок 2.5 – Одновременное прибытие нескольких ВС с одного направления

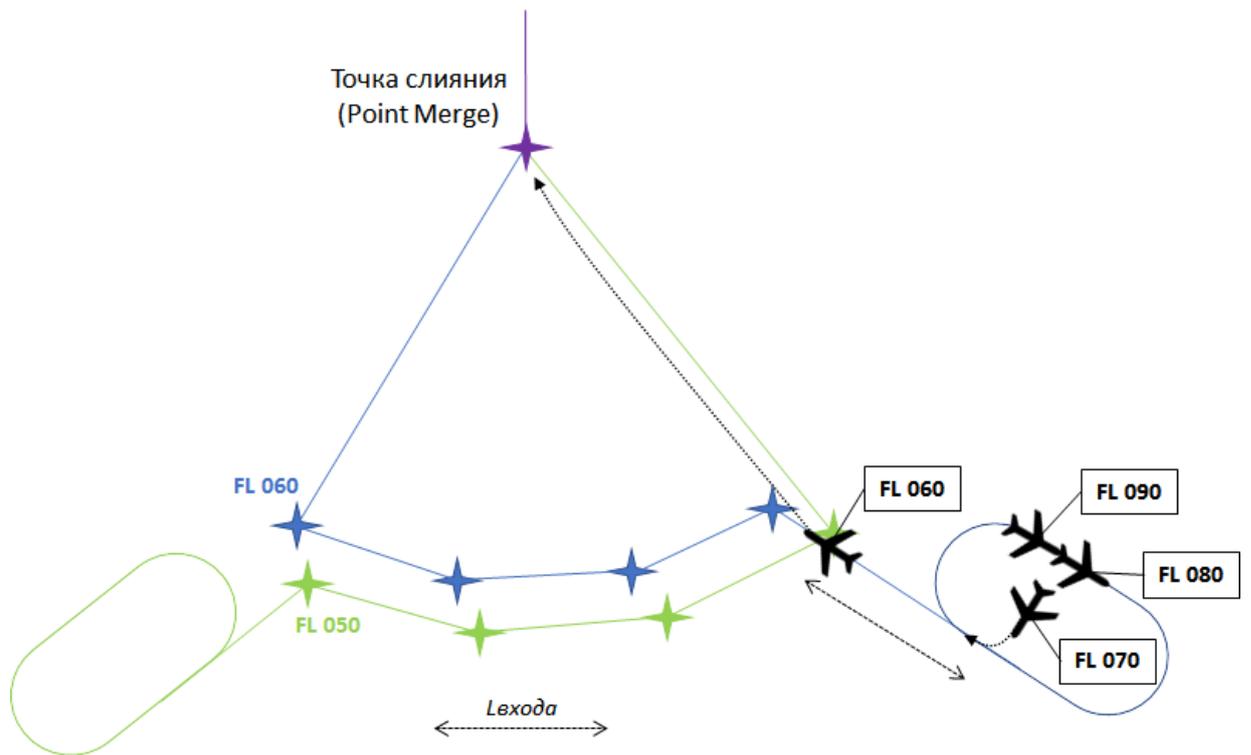


Рисунок 2.6 – Использование зоны ожидания для формирования горизонтальных интервалов на одном эшелоне

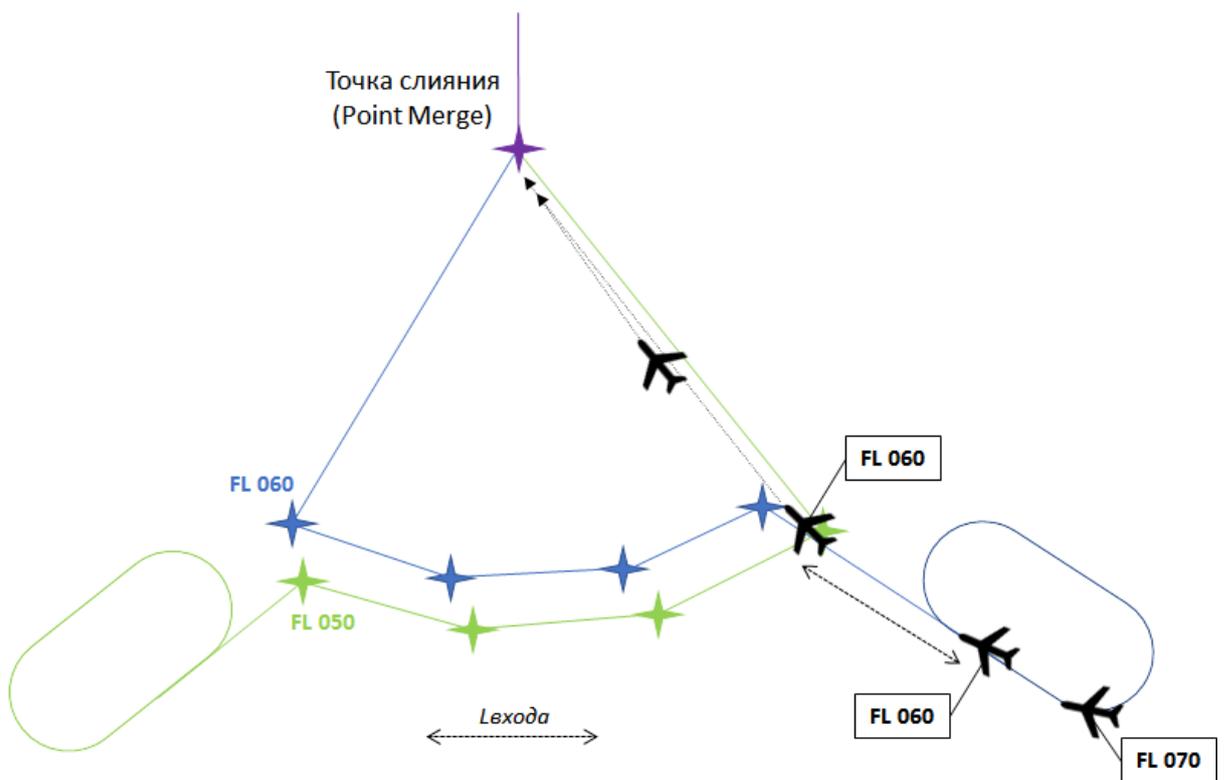


Рисунок 2.7 – Результат формирования горизонтальных интервалов на одном эшелоне с использованием зоны ожидания

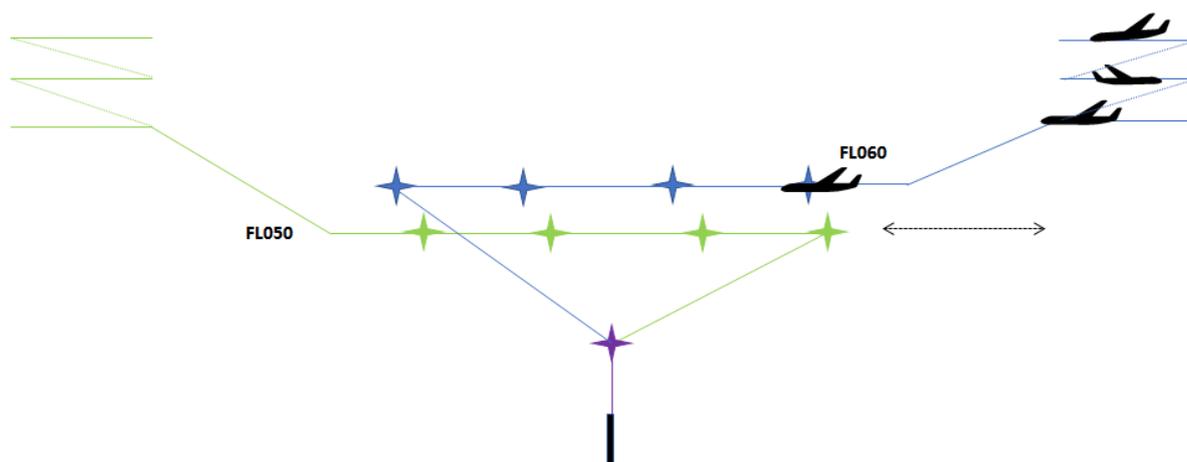


Рисунок 2.8– Вертикальный разрез расположения ВС

## 2.2. Модель традиционной системы слияния потоков с помощью сети массового обслуживания

Традиционную систему слияния потоков, включая ВПП и зоны ожидания, расположенные на траекториях прибытия ДПП можно представить как сеть систем массового обслуживания (СМО) [69 – 76].

В предлагаемой модели ВПП представлена как одноканальная система массового обслуживания (СМО) с отказом типа G/G/1. Заявкой в такой СМО будут являться непосредственно ВС, прибывающие на посадочную прямую с интенсивностью потока  $\lambda_{\text{ВПП}}$ , обслуживающим каналом будет являться непосредственно ВПП. Результатом обслуживания будет сформированный поток ВС освобождающих ВПП, выполняющих заруливание на перрон аэродрома  $\lambda_{\text{а/д}}$ . Соответственно отказом будет являться ситуация, когда ВС не может быть «обслужено» по причине занятости ВПП, в этом случае ВС выполняет уход на второй круг, формируется поток ВС, которым отказано в обслуживании  $\lambda_{\text{отк}}$ . Таким образом, сформированный поток ВС на аэродроме составит:

$$\lambda_{\text{а/д}} = \lambda_{\text{ВПП}} - \lambda_{\text{отк}}$$

Фактически задача самой системы слияния потоков в этом случае, является формирование потока ВС на посадочную прямую (т.е. потока ВС для СМО ВПП). СМО системы слияния потоков можно представить как одноканальную СМО с

ограниченным количеством заявок в очереди и с детерминированным временем обслуживания типа G/D/1. При этом СМО системы слияния потоков имеет два входа для потока входящих заявок. Заявками будут ВС, поступающие на траектории задержки системы слияния потоков через точки входа, соответственно СМО системы слияния потоков, как правило, имеет два потока входящих заявок:  $\lambda_{\text{ссп1}}$  и  $\lambda_{\text{ссп2}}$ . Каналом обслуживания будет воздушное пространство между траекториями задержки системы слияния потоков и точкой слияния. Результатом обслуживания является сформированный поток посадочной прямой  $\lambda_{\text{впп}}$ .

Еще одним компонентом сети массового обслуживания будут траектории прибытия и зоны ожидания расположенные на траекториях прибытия ДПП. Учитывая то, что в типовой системе слияния потоков выход на траекторию задержки возможен только на одном эшелоне, СМО ДПП будет также являться одноканальной СМО типа G/D/1 с ограниченным временем ожидания заявок в очереди, так как ожидание возможно только до тех пор, пока ВС имеют определенный резерв топлива. Заявками на обслуживание будут являться ВС, поступающие на траекторию прибытия, в рассматриваемом случае  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Каналом обслуживания является эшелон зоны ожидания, предназначенный для вывода ВС на траекторию задержки. Результатом обслуживания будут соответственно сформированные на точки входа траекторий задержки потоки  $\lambda_{\text{ссп1}}$  и  $\lambda_{\text{ссп2}}$ . ВС будут находиться в зонах ожидания до момента освобождения канала обслуживания. При этом если количество ВС выполняющих полет по траектории задержки  $i$  достигнет предельного количества  $I$  (предел количества заявок СМО ССП), выход из СМО ДПП станет на какое-то время невозможным, что приведет к увеличению времени обслуживания СМО ДПП. В целях недопущения такой ситуации, суммарная пропускная способность СМО ДПП1 и СМО ДПП2 не должна превышать пропускной способности СМО ССП.

Таким образом, традиционную систему слияния потоков, предназначенную для обслуживания потока заходящих на посадку ВС можно представить в виде совокупности трех СМО, общий вид такой модели представлен на рисунке 2.9.

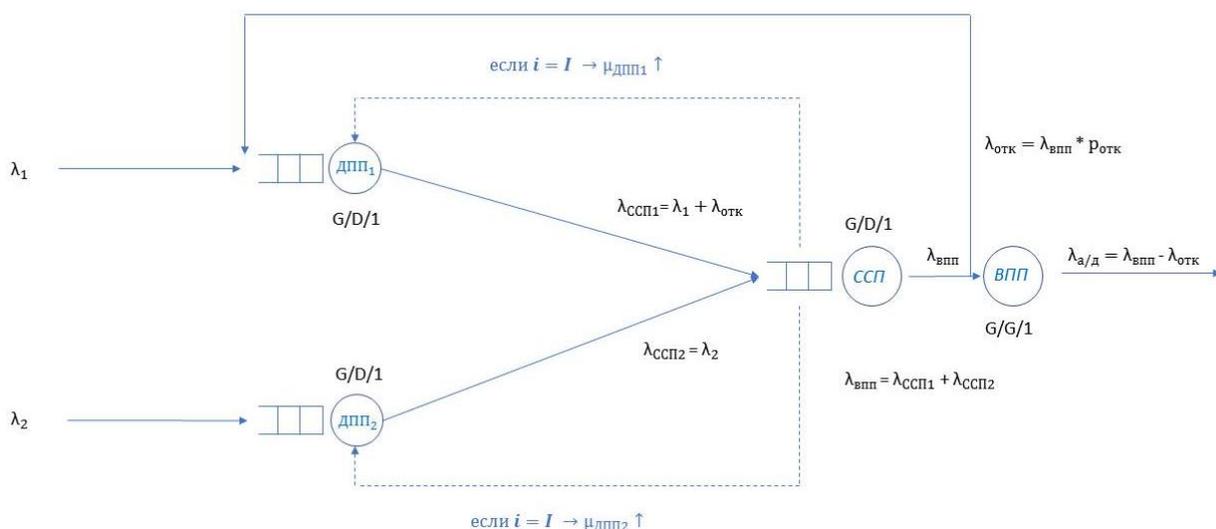


Рисунок 2.9 – Модель традиционной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания

### 2.3. Исследование традиционной системы слияния потоков с помощью представленной модели

Проанализируем пропускную способность представленной сети массового обслуживания. Предположим, что ограничений по пропускной способности ВПП, предназначенной для посадки ВС нет [77], она оборудована скоростными рулежными дорожками и время её занятости мало. В таких условиях поток  $\lambda_{\text{впп}}$  будет зависеть только от существующего минимума эшелонирования, который, при аэродромном диспетчерском обслуживании составляет  $L_{\text{адо}} = 5$  км [68]. С учетом интервала эшелонирования определим предельно возможную интенсивность потока перед порогом ВПП, которая может быть создана с применением минимального интервала. Допустим, что поток прибывающих ВС состоит из однотипных ВС типа Ту-204 [78]. С учетом того, что интервал эшелонирования соблюдается пока ВС в воздухе, крайней потребной точкой соблюдения интервала  $L_{\text{адо}}$ , будет положение ВС в 5 км от порога ВПП посадки.

Время прохождения данной дистанции  $T_{\text{адоглицс}}$  будет определять предельную пропускную способность ВП посадочной прямой  $\mu_{\text{вп\_пос}}$ , выраженную в ВС/час:

$$\mu_{\text{вп\_пос}} = \frac{1}{T_{\text{адоглицс}}} = 1/L_{\text{адо}}/W_{\text{глицс}} = W_{\text{глицс}}/L_{\text{адо}}, \quad (2.5)$$

где  $W_{\text{глицс}}$  – скорость движения ВС на глиссаде.

С учетом того, что скорость движения ВС типа Ту-204 на данном участке  $W_{\text{глицс}} = 240$  км/час, получим:

$$\mu_{\text{вп\_пос}} = \frac{W_{\text{глицс}}}{L_{\text{адо}}} = \frac{240}{5} = 48 \text{ ВС/час}$$

Таким образом, для полного использования ресурсов посадочной прямой поток, создаваемый СМО должен соответствовать 48 ВС/час, тогда пропускная способность СМО системы слияния потоков  $\mu_{\text{ссп}} = 48$  ВС/час.

Траектории задержки системы слияния потоков предназначены для формирования задержки и регулирования интервала на посадку ВС, однако ожидание на таких траекториях ограничено емкостью траектории задержки и времени полета по ней.

Потоки с интенсивностями  $\lambda_{\text{ссп1}}$  и  $\lambda_{\text{ссп2}}$ , формируются ДПП. При этом время обслуживания будет зависеть от применяемого интервала эшелонирования при диспетчерском обслуживании подхода  $L_{\text{доп}} = 10$  км, а также скорости полета перед входом на траекторию задержки, которая будет соответствовать оптимальной скорости ожидания. При этом следует учесть потери интервала эшелонирования при выполнении разворота на траектории задержки, который составляет 90 градусов, тогда, потребный интервал горизонтального эшелонирования  $L_{\text{тз}}$  с учетом потери интервала в развороте составляет:

$$L_{\text{тз}} = 14,2 \text{ км}$$

Для расчета пропускной способности СМО ДПП используем формулу:

$$\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = \frac{W_{\text{тз}}}{L_{\text{тз}}}, \quad (2.6)$$

где  $W_{\text{тз}}$  – скорость движения ВС на траектории задержки.

Рассчитаем пропускную способность СМО ДПП с учетом  $L_{\text{тз}} = 14,2$  км и скорости полета по траектории задержки  $W_{\text{тз}} = 400$  км/час.

$$\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = \frac{W_{\text{т3}}}{L_{\text{т3}}} = \frac{400}{14,2} = 28,17 = 28 \text{ ВС/час}$$

Суммарная пропускная способность СМО ДПП составит:

$$\mu_{\text{дпп1+дпп2}} = \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}} \quad (2.7)$$

$$\mu_{\text{дпп1+дпп2}} = 28 + 28 = 56 \text{ ВС/час}$$

Таким образом, полная абсолютная пропускная способность сети массового обслуживания будет равна:

$$A\mu_{\text{Семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) \quad (2.8)$$

Тогда,

$$A\mu_{\text{Семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 48 \text{ ВС/час}$$

Потоки большей интенсивности не могут быть обслужены.

При этом существует ограничение, накладываемое пропускной способностью СМО ДПП1 и СМО ДПП2. При потоке  $\lambda_1 = 0$ ,  $A\mu_{\text{Семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 28 \text{ ВС/час}$ , при потоке  $\lambda_2 = 0$ ,  $A\mu_{\text{Семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 28 \text{ ВС/час}$ . Таким образом, при потоках  $\lambda_1 \geq 28$  и/или  $\lambda_2 \geq 28$  образуется очередь бесконечной длины.

В результате абсолютная пропускная способность будет располагаться в пределах:  $28 \leq A\mu_{\text{Семо}} \leq 48$ . Работоспособность сети массового обслуживания будет определяться системой уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 48 \\ \lambda_1 \leq 28 \\ \lambda_2 \leq 28 \end{cases} \quad (2.9)$$

График зависимости абсолютной пропускной способности сети массового обслуживания от соотношения интенсивностей входящих потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  представлен на рисунке 2.10.

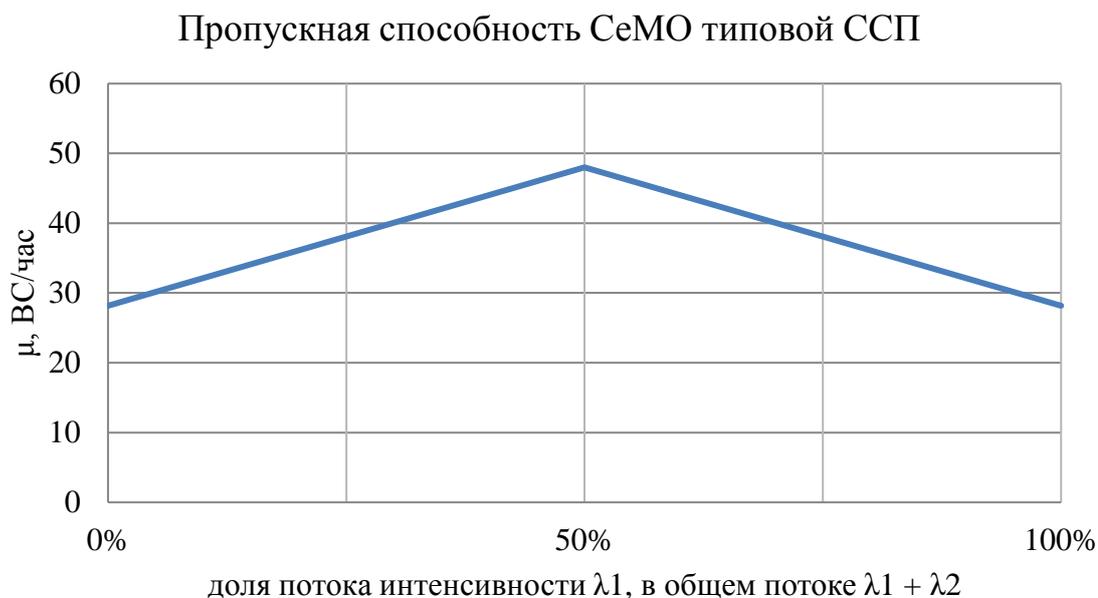


Рисунок 2.10 – График зависимости пропускной способности от соотношения потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в сети массового обслуживания традиционной системы слияния потоков

Таким образом, ключевой недостаток традиционной системы слияния потоков состоит в том, что пропускная способность системы при неравномерном потоке прибывающих ВС падает на 41,6% (с 48 ВС/час до 28 ВС/час). Это влечет за собой дополнительные задержки ВС в воздухе, и как следствие увеличение расхода топлива. Увеличение расхода топлива, в свою очередь, приводит к повышению количества выбросов загрязняющих атмосферу веществ.

Возникает задача увеличения пропускной способности ССП при любом соотношении потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

### Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель работы традиционной ССП с использованием временных диаграмм. С использованием разработанной математической модели проанализирована работа ССП в различных условиях (при полностью равномерном и полностью неравномерном распределении потоков прибывающих ВС). Показано увеличение времени обслуживания

(формирования интервалов на посадку) при абсолютно неравномерном распределении потоков прибывающих ВС в сравнении со значениями, полученными при абсолютно неравномерном распределении потоков прибывающих ВС. Аналогов разработанной модели в зарубежной и отечественной научной литературе не выявлено.

2. Разработана математическая модель ССП с использованием сети массового обслуживания. С использованием разработанной модели проведено исследование традиционной ССП в условиях полностью равномерного и полностью неравномерного распределения потоков прибывающих ВС. Показано снижение пропускной способности традиционной ССП в зависимости от степени неравномерности распределения потока прибывающих ВС по точкам входа (на величину до 41,6 % при полностью неравномерном распределении прибывающих ВС по точкам входа).

3. Требуется разработка усовершенствованной системы слияния потоков, которая позволит исключить или снизить потери пропускной способности при абсолютно неравномерном распределении потоков прибывающих ВС.

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ И МЕТОДА ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

#### 3.1. Модель усовершенствованной системы слияния потоков

Повышение пропускной способности СеМО, представленной на рисунке 2.8 при неравномерном входном потоке прибывающих ВС, т.е. при  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  или при  $\lambda_1 \gg \lambda_2$  может быть осуществлено двумя основными путями.

Первый путь – предполагает принудительное уравнивание входных потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Для уравнивания потоков часть ВС потока большей интенсивности перенаправляется на входную точку потока меньшей интенсивности. При реализации на практике такой подход к повышению пропускной способности имеет следующие недостатки:

- увеличение траектории полета прибывающих ВС за счет дополнительного участка;
- сокращение доступности воздушного пространства для других пользователей;
- формирование новых конфликтных точек пересечения траекторий;
- сложность технологического процесса с точки зрения организации диспетчерами УВД перехода части потока на другую входную точку.

Второй путь повышения пропускной способности системы состоит в использовании нескольких эшелонов полета для прибывающих ВС (вместо одного) для каждой точки входа на траектории задержки. При этом, занятые эшелоны одной точки входа должны быть недоступными для потоков ВС прибывающих с противоположного направления. Однако количество доступных для использования эшелонов ограничено, так как используемые эшелоны должны иметь достаточную высоту для обеспечения возможности успешного снижения к точке слияния потоков.

В таком случае СМО каждого ДПП следует рассматривать как многоканальную, при этом доступность каналов обслуживания зависит от того используются ли эти каналы противоположной СМО ДПП. Для того, чтобы количество каналов на каждой СМО ДПП соответствовало интенсивности потоков прибывающих ВС необходимо распределять каналы обслуживания между СМО с учетом соотношения интенсивности потоков. Распределение каналов обслуживания между двумя СМО можно найти по формуле:

$$k = \left[ \frac{n}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1} \right], n = const, l = n - k, \quad (3.1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – интенсивности потоков ВС, поступающих на СМО ДПП<sub>1</sub> и ДПП<sub>2</sub> соответственно;

$n$  – общее количество доступных эшелонов (каналов СМО) на траекториях задержки;

$k$  – количество доступных эшелонов (каналов СМО) на траектории задержки СМО ДПП<sub>1</sub>;

$l$  – количество доступных эшелонов (каналов СМО) на траектории задержки СМО ДПП<sub>2</sub>.

Следует учитывать ситуацию, при которой один из потоков  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$  очень мал относительно другого потока. В этом случае, при полученных значениях  $k$ , расположенных в диапазонах  $0 < k < 1$  или  $n > k > n - 1$ , следует округлять значение  $k$ , таким образом, чтобы существовал хотя бы один канал для противоположного потока малой интенсивности.

Тогда, при  $0 < k < 1$ ,  $k := 1$ , а при  $n > k > n - 1$ ,  $k := n - 1$ .

Модель соответствующей сети массового обслуживания ССП представлена на рисунке 3.1.

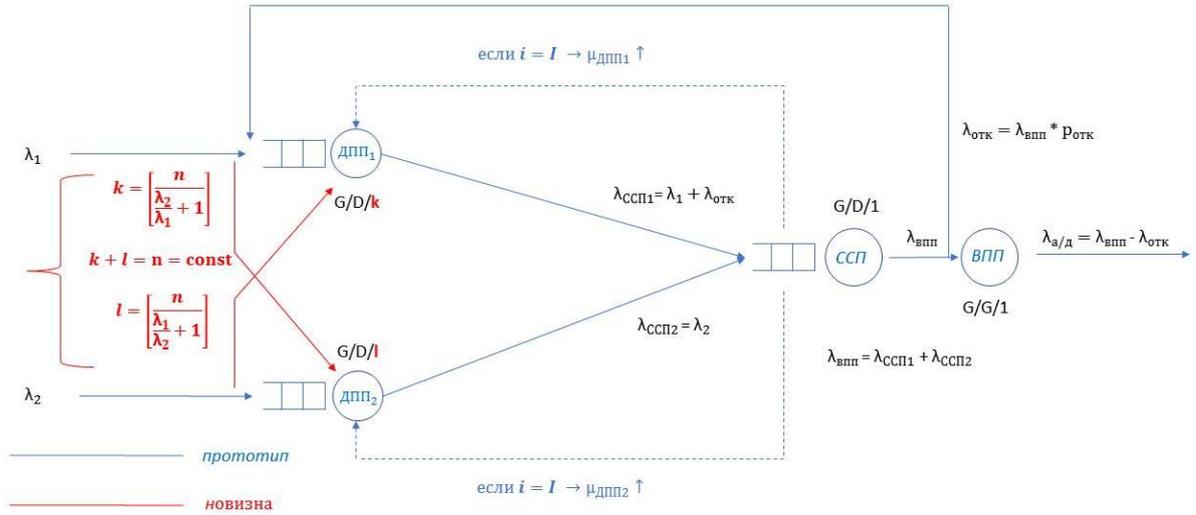


Рисунок 3.1 – Модель усовершенствованной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания

Согласно [70] определим необходимое число каналов обслуживания –  $n$ , которое будет зависеть от интенсивности нагрузки каналов  $p$ , представляющей собой отношение общей интенсивности входящих потоков  $\lambda$  к интенсивности потока обслуживаний  $\mu$ :

$$\begin{aligned}
 n &> p \\
 p &= \frac{\lambda}{\mu} \\
 p &= \frac{\lambda}{\mu} = \frac{48}{28} = 1,714 \\
 n &= 2
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Однако следует учитывать, что при занятости обоих каналов поток любой интенсивности с противоположной стороны не может быть обслужен, тогда при ситуации  $\lambda_1 + \lambda_2 = 48, \lambda_1 > 28, \lambda_2 > 0$ , для обслуживания потока интенсивности  $\lambda_2$  не будет выделен ни один канал.

В этом случае необходимо увеличивать количество каналов как минимум на 1 в целях обеспечения обслуживания всех потоков тогда:

$$n := n + 1$$

Таким образом, при применении нескольких каналов (а данном случае 3-х) пропускная способность СМО ДПП не будет зависеть от соотношения потоков прибывающих ВС. Пропускная способность сети массового обслуживания усовершенствованной ССП представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – График зависимости пропускной способности от соотношения потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в сети массового обслуживания усовершенствованной системы слияния потоков

С использованием математического аппарата систем массового обслуживания [70, 71] найдем среднее время ожидания в очереди для СеМО традиционной системы слияния потоков  $T_{оч\_тссп}$  и СеМО усовершенствованной системы слияния потоков  $T_{оч\_уссп}$ .

Для СМО среднее время ожидания  $T_{оч}$  можно определить по формуле:

$$T_{оч} = \frac{1}{\lambda} * L_{оч}, \quad (3.3)$$

где  $L_{оч}$  – длина очереди;

$\lambda$  – интенсивность входного потока.

В свою очередь  $L_{оч}$ , для одноканальной СМО типа G/D/1 определяется по формуле [71]:

$$L_{оч} = \frac{p^2}{1-p}, \quad (3.4)$$

где  $p$  – интенсивность нагрузки каналов.

Для многоканальной СМО  $L_{оч}$  зависит от количества каналов СМО  $n$ , с учетом определенной предельной вероятности того, что СМО свободна  $P_0$  и определяется по формуле:

$$L_{оч} = \frac{p^{n+1} * P_0}{n * n!} * \left(1 - \frac{p}{n}\right)^{-2} \quad (3.5)$$

Предельная вероятность того, что СМО свободна, зависит от интенсивности нагрузки каналов  $p$  и непосредственно количества каналов  $n$ , и в соответствии с [70] определяется по формуле:

$$P_0 = \left(1 + \frac{p^1}{1!} + \frac{p^2}{2!} + \dots + \frac{p^n}{n!} + \frac{p^{n+1}}{n! * (n-p)}\right)^{-1} \quad (3.6)$$

С учетом того, что среднее время ожидания  $T_{оч}$ , в случае расчета для одноканальной ССП будет определяться независимо для СМО ДПП1 и СМО ДПП2, среднее время ожидания для традиционной системы слияния потоков  $T_{оч\_тссп}$  будет представлять собой отношение суммы времен ожидания в очереди СМО ДПП1 и СМО ДПП2, полученную произведением среднего времени ожидания каждой СМО на интенсивность потока каждой СМО, к сумме интенсивности данных потоков. Для определения среднего времени ожидания в очереди традиционной системы слияния потоков используем формулу:

$$T_{оч\_тссп} = \frac{(T_{оч\_дпп1} * \lambda_1 + T_{оч\_дпп2} * \lambda_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2)}, \quad (3.7)$$

где

$$T_{оч\_дпп1} = \frac{1}{\lambda_1} * L_{оч\_дпп1}, \quad T_{оч\_дпп2} = \frac{1}{\lambda_2} * L_{оч\_дпп2}, \quad (3.8)$$

$$L_{оч\_дпп1} = \frac{p_{дпп1}^2}{1 - p_{дпп1}}, \quad L_{оч\_дпп2} = \frac{p_{дпп2}^2}{1 - p_{дпп2}}, \quad (3.9)$$

$p_{дпп1}$  и  $p_{дпп2}$  – интенсивность нагрузки канала СМО ДПП1 и ДПП2 соответственно, рассчитываются по формулам:

$$p_{дпп1} = \frac{\lambda_1}{\mu_{дпп1}}, \quad p_{дпп2} = \frac{\lambda_2}{\mu_{дпп2}}, \quad (3.10)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – потоки входящих заявок (ВС) на СМО ДПП1 и СМО ДПП2;

$\mu_{дпп1}$  и  $\mu_{дпп2}$  – интенсивности потоков обслуживания СМО ДПП1 и СМО ДПП2, при этом:

$$\begin{cases} \mu_{дпп1} + \mu_{дпп2} = 48 \\ \mu_{дпп1} \leq 28 \\ \mu_{дпп2} \leq 28 \end{cases} \quad (3.11)$$

Приведем итоговую формулу для расчета  $T_{оч\_тссп}$ :

$$T_{оч\_тссп} = \frac{T_{оч\_дпп1} * \lambda_1 + T_{оч\_дпп2} * \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{2(\lambda_1 + \lambda_2)} * \left( \frac{\lambda_1^2}{\mu_1(\mu_1 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_2^2}{\mu_2(\mu_2 - \lambda_2)} \right) \quad (3.12)$$

Расчет среднего времени ожидания в усовершенствованной системе слияния потоков  $T_{оч\_уссп}$  выполняется по формуле (3.2), так как фактически в усовершенствованной ССП СМО ДПП являются многоканальными, а сами каналы являются общими для СМО ДПП1 и СМО ДПП2. Таким образом, СМО ДПП можно рассматривать как единую многоканальную СМО.

$$T_{оч\_уссп} = \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)} * L_{оч\_уссп}, \quad (3.13)$$

где  $L_{оч\_уссп}$  – длина очереди заявок усовершенствованной ССП, рассчитываемой по формуле:

$$L_{оч\_уссп} = \frac{p^{n+1} * P_0}{n * n!} * \left( 1 - \frac{p}{n} \right)^{-2}, \quad (3.14)$$

где  $p$  – интенсивность нагрузки каналов, рассчитывается по формуле (3.2), с учетом суммы интенсивности двух потоков формула примет вид:

$$p = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu}, \quad (3.15)$$

где  $\mu$  – интенсивность потока обслуживаний, суммарно всех каналов, но не более 48 заявок в час;

$n$  – количество каналов (в данной работе приведен расчет для 3-х каналов);

$P_0$  – предельная вероятность того, что СМО свободна, рассчитывается по формуле из математического аппарата СМО [70]:

$$P_0 = \left( 1 + \frac{p^1}{1!} + \frac{p^2}{2!} + \dots + \frac{p^n}{n!} + \frac{p^{n+1}}{n! * (n-p)} \right)^{-1}, \quad (3.16)$$

с учетом того, что  $n = 3$ , приведем формулы для выполнения расчета:

$$P_0 = \left(1 + p + \frac{p^2}{2} + \frac{p^3}{6} + \frac{p^4}{6*(3-p)}\right)^{-1} \quad (3.17)$$

$$L_{\text{оч\_усп}} = \frac{p^4 * P_0}{18} * \left(1 - \frac{p}{3}\right)^{-2} \quad (3.18)$$

$$T_{\text{оч\_усп}} = \frac{p^4 * P_0 * \left(1 - \frac{p}{3}\right)^{-2}}{18 * (\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (3.19)$$

### 3.2. Сравнительный анализ традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков

Проведем необходимые расчеты в зависимости от неравномерности потоков прибывающих ВС, исходя из различной суммарной интенсивности потока  $\lambda_1 + \lambda_2 =$  от 0 до 46 ВС/час. Смоделируем две ситуации:

1. Абсолютно равномерное движение  $\lambda_1 / \lambda_2 = 1$ , при этом для традиционной ССП распределение пропускной способности между двумя СМО ДПП будет равной  $\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = 24$  ВС/час, для усовершенствованной ССП пропускная способность всех каналов  $\mu = 48$  ВС/час.
2. Абсолютно неравномерное движение  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 27$ , тогда для традиционной ССП  $\mu_{\text{дпп1}} = 20$  ВС/час,  $\mu_{\text{дпп2}} = 28$  ВС/час, так как максимум потока будет именно на ДПП2, для усовершенствованной ССП пропускная способность всех каналов  $\mu = 48$  ВС/час.

Сведем полученные данные в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Результаты расчетов среднего времени ожидания ВС

$\lambda_1 + \lambda_2$ ВС/час	$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1$ $T_{\text{оч}}, \text{min}$		$\lambda_1 = 0$ $T_{\text{оч}}, \text{min}$	
	СМО ТССП	СМО УССП	СМО ТССП	СМО УССП
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0,1	0
3	0	0	0,13	0

$\lambda_1 + \lambda_2$ ВС/час	$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1$ $T_{оч}, \text{min}$		$\lambda_1 = 0$ $T_{оч}, \text{min}$	
	СеМО ТССП	СеМО УССП	СеМО ТССП	СеМО УССП
4	0,11	0	0,18	0
5	0,14	0	0,23	0
6	0,17	0	0,29	0
7	0,2	0	0,36	0
8	0,25	0	0,43	0
9	0,28	0	0,5	0
10	0,33	0	0,6	0
11	0,37	0	0,69	0
12	0,42	0	0,8	0
13	0,46	0,1	0,93	0,1
14	0,5	0,11	1,07	0,12
15	0,57	0,14	1,24	0,14
16	0,625	0,17	1,4	0,17
17	0,69	0,2	1,7	0,2
18	0,75	0,24	1,9	0,24
19	0,8	0,29	2,3	0,29
20	0,89	0,33	2,7	0,33
21	0,97	0,39	3,2	0,39
22	1,06	0,45	3,9	0,45
23	1,15	0,52	4,9	0,52
24	1,25	0,59	6,4	0,59
25	1,36	0,67	8,9	0,67
26	1,47	0,77	13	0,77
27	1,6	0,8	29	0,8
28	1,75	1	-	1
29	1,9	1,14	-	1,14
30	2,08	1,29	-	1,29
31	2,28	1,47	-	1,47
32	2,5	1,66	-	1,66
33	2,75	1,9	-	1,9
34	3,04	2,16	-	2,16
35	3,37	2,47	-	2,47
36	3,75	2,84	-	2,84
37	4,2	3,28	-	3,28
38	4,75	3,8	-	3,8
39	5,4	4,45	-	4,45

$\lambda_1 + \lambda_2$ ВС/час	$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1$ $T_{оч}, \text{min}$		$\lambda_1 = 0$ $T_{оч}, \text{min}$	
	СеМО ТССП	СеМО УССП	СеМО ТССП	СеМО УССП
40	6,25	5,27	-	5,27
41	7,32	6,32	-	6,32
42	8,75	7,73	-	7,73
43	10,75	9,71	-	9,71
44	13,75	12,7	-	12,7
45	18,75	17,68	-	17,68
46	28,75	27,67	-	27,67

Таким образом, в результате разработки модели усовершенствованной системы слияния потоков, получены следующие результаты:

1. При неравномерности потоков прибывающих ВС применение усовершенствованной ССП позволяет достичь больших показателей пропускной способности.

2. Применение усовершенствованной ССП позволяет существенно снизить среднее время ожидания ВС, что приводит к сокращению расхода топлива и, как следствие, снижению выбросов загрязняющих атмосферу веществ.

3. Снижение среднего времени ожидания уменьшает риск ухода ВС на запасной аэродром, при достижении предельно возможного времени ожидания.

Зависимость среднего времени ожидания от интенсивности потоков прибывающих ВС при применении типовой ССП и усовершенствованной ССП, в случае равномерного распределения потоков прибывающих ВС представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – График зависимости среднего времени ожидания от интенсивности потоков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в сети массового обслуживания типовой ССП и усовершенствованной ССП, при равномерном распределении потоков прибывающих ВС

Из графика следует, что при равномерном распределении потоков прибывающих ВС среднее время ожидания практически идентично.

В случае, если входной поток на одной из точек входа полностью отсутствует (максимально возможная неравномерность), пропускная способность СеМО типовой ССП падает до значений пропускной способности одного из СМО ДПП, среднее время ожидания при этом существенно увеличивается. Зависимость времени ожидания при таком распределении представлена на рисунке 3.4.

Зависимость среднего времени ожидания от общей  
интенсивности входных потоков  
 $\lambda_1 = 0$

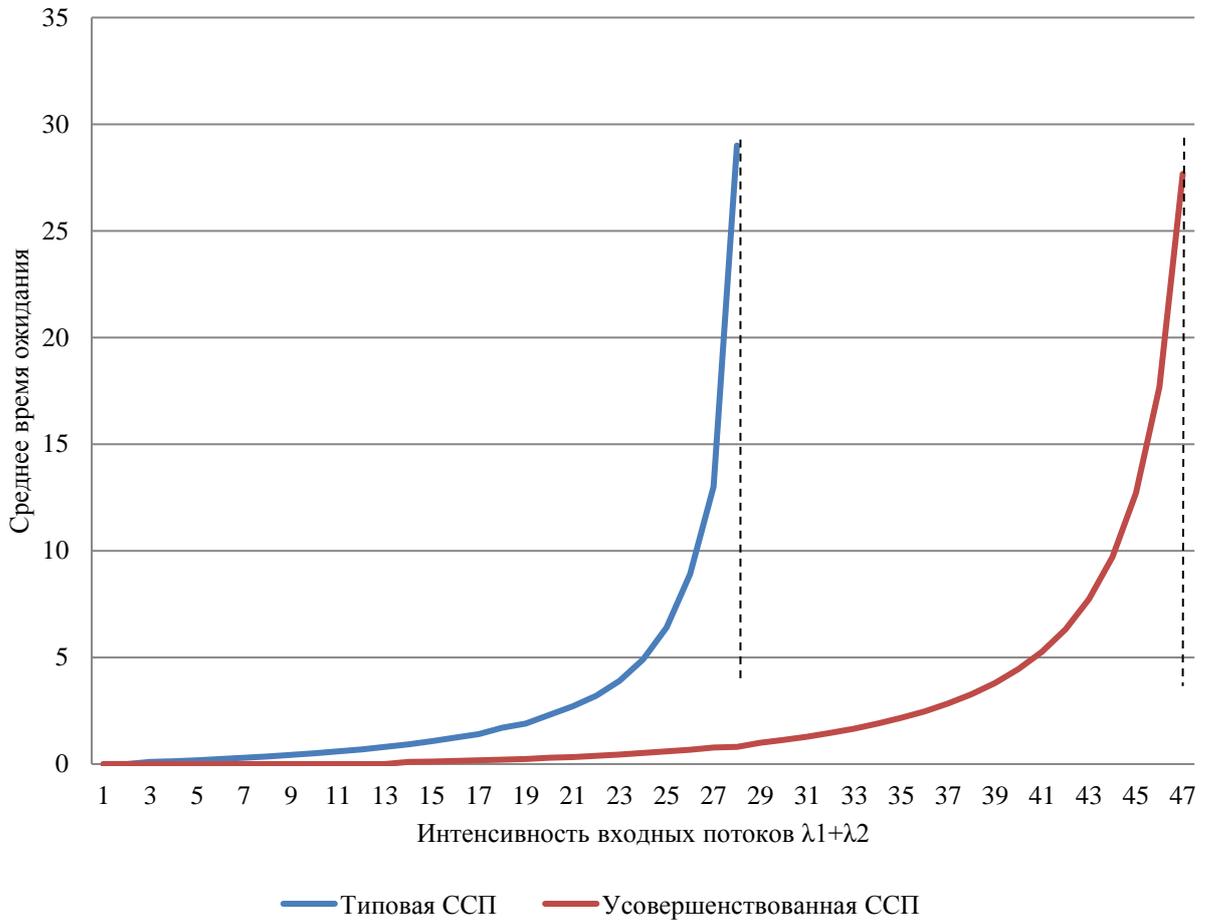


Рисунок 3.4 – График зависимости среднего времени ожидания ВС  $T_{оч}$  от суммарной интенсивности потоков  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$  в сети массового обслуживания типовой ССП и усовершенствованной ССП, при предельно неравномерном ( $\lambda_1 = 0$ ) распределении потоков прибывающих ВС

Таким образом, можно заключить что в случае предельно неравномерного потока прибывающих ВС при сопоставимом среднем времени ожидания  $T_{оч}$  (29 минут для типовой ССП и 27 минут для усовершенствованной ССП) пропускная способность сети массового обслуживания возрастает с 28 до 48 ВС/час (на 70%).

### 3.3. Разработка метода организации воздушного движения прибывающих воздушных судов с использованием усовершенствованной системы слияния потоков

Для использования усовершенствованной системы слияния потоков, требуется разработка соответствующего метода. Усовершенствованная система слияния потоков отличается большим количеством используемых для полета по траектории задержки эшелонов (как минимум 3-х), а также возможностью их реверсивного использования. Конкретное количество эшелонов для движения в соответствующем направлении следует определять исходя из соотношения интенсивности потоков прибывающих ВС на точки входа системы слияния потоков. Для расчета требуемого количества эшелонов будем использовать выведенную при разработке математической модели усовершенствованной системы слияния потоков формулу (3.1):

$$k = \left[ \frac{n}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1} \right], n = const, l = n - k,$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – интенсивности потоков ВС, поступающих на 1-ю траекторию и 2-ю траекторию задержки соответственно;

$n$  – общее количество доступных эшелонов на траекториях задержки;

$k$  – количество доступных эшелонов на 1-й траектории задержки;

$l$  – количество доступных эшелонов на 2-й траектории задержки.

Рассмотрим работу метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков, при неравномерном распределении прибывающих на посадку ВС по направлениям прибытия (рисунок 3.5).

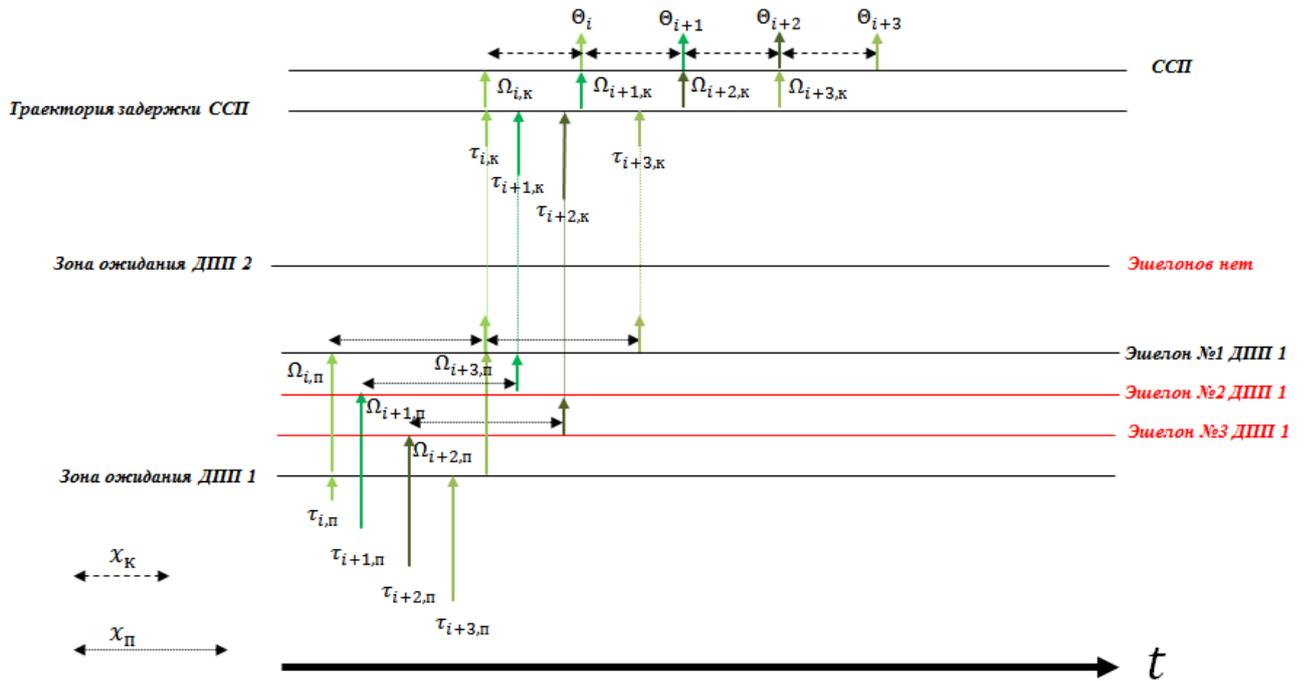


Рисунок 3.5 – Работа метода с использованием усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки

Предположим, что суммарно возможно использовать три эшелона полета для выхода из зоны ожидания и следования по траекториям задержки  $n = 3$ . Исходя из представленного распределения прибывающих ВС, можно заключить, что поток через зону ожидания ДПП 2 отсутствует,  $\lambda_2 = 0$ , а поток через зону ожидания ДПП 1 составляет  $\lambda_1 = 4$ , тогда следуя (3.1):

$$k = \left\lfloor \frac{3}{\frac{0}{4} + 1} \right\rfloor = 3, \quad l = n - k = 3 - 3 = 0$$

Таким образом, для ДПП 1 должно быть выделено - 3 эшелона полета, а для ДПП 2 - 0 эшелонов полета.

ВС  $i, i+1, i+2, i+3$ , поступают в зоны ожидания ДПП с некоторой разницей по времени, меньшей, чем  $\chi_{\Pi}$  и  $\chi_{\kappa}$ . При этом все ВС поступают в зону ожидания ДПП 1. Так как других ВС в зоне ожидания ДПП 1 перед ВС  $i$  нет, ВС  $i$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, занимая эшелон №1, таким образом  $\Omega_{i,\Pi} = \tau_{i,\Pi}$ . ВС  $i+1$ , попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на

траекторию задержки, однако эшелон №2 свободен, поэтому ВС  $i+1$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, занимая эшелон №2, таким образом  $\Omega_{i+1,п} = \tau_{i+1,п}$ . ВС  $i+2$ , попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i+1$  и ВС  $i+2$  еще находятся на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, однако эшелон №3 свободен, поэтому ВС  $i+2$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, занимая эшелон №3, таким образом  $\Omega_{i+2,п} = \tau_{i+2,п}$ . ВС  $i+3$  попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$ , ВС  $i+1$ , ВС  $i+2$  еще находятся на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, и занимают все эшелоны доступные для полета, в результате ВС  $i+3$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i+3,п} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$ , заняв эшелон №1, так как она освободится раньше.

ВС  $i$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков первым, во время  $\tau_{i,к} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$  и имеет возможность следовать прямо на точку слияния, в результате  $\Omega_{i,к} = \tau_{i,к}$ , а время  $\Theta_i = \Omega_{i,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ .

ВС  $i+1$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+1,к} = \Omega_{i+1,п} + \chi_{п} = \tau_{i+1,п} + \chi_{п}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, за предыдущим ВС  $i$  интервал на посадку еще не сформирован. ВС  $i+1$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+1,к} = \Theta_i = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ , время завершения формирования интервала на посадку для ВС  $i+1$  составит  $\Theta_{i+1} = \Omega_{i+1,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ .

ВС  $i+2$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+2,к} = \Omega_{i+2,п} + \chi_{п} = \tau_{i+2,п} + \chi_{п}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, на траектории задержки все еще находится ВС  $i+1$ , которое ожидает возможности отворота на точку слияния за ВС  $i$ . ВС  $i+2$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+2,к} = \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ , т.е. когда предыдущее ВС  $i+2$  достигнет точки завершения формирования интервала. Время завершения формирования интервала для ВС  $i+2$  составит  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к}$ .

ВС  $i+3$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+3,к} = \Omega_{i+3,п} + \chi_{п} = \tau_{i,п} + 2\chi_{п}$ , данное ВС задерживалось в зоне ожидания да тех пор, пока не освободился эшелон №1. Во время  $\tau_{i+3,к}$ , на траектории задержки все еще находится ВС  $i+2$ , ожидающее возможности отворота на точку слияния за ВС  $i+1$ , когда интервал на посадку будет сформирован. ВС  $i+3$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+3,к} = \Theta_{i+2} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к}$ , тогда время завершения обслуживания для формирования интервала для ВС  $i+3$  составит  $\Theta_{i+3} = \Omega_{i+3,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 4\chi_{к}$ .

В результате время завершения формирования интервала для каждого ВС можно выразить для этой ситуации как:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 4\chi_{к} \end{cases} \quad (3.20)$$

Можно сделать вывод о том, что время окончания формирования интервала при предлагаемом методе организации воздушного движения прибывающих ВС в условиях их неравномерного распределения, в зависимости от направления прибытия, полностью совпадают с результатами, полученными при использовании традиционного метода использования системы слияния потоков, в условиях равномерного распределения прибывающих ВС.

Таким образом, время завершения формирования интервала между ВС различается только на время необходимое для формирования интервала при аэродромном диспетчерском обслуживании  $\chi_{к}$ , достигается высокая эффективность аэронавигационного обслуживания без потерь при формировании интервалов.

Пример работы разработанной усовершенствованной системы слияния потоков в этом случае представлен на рисунках 3.6 – 3.9

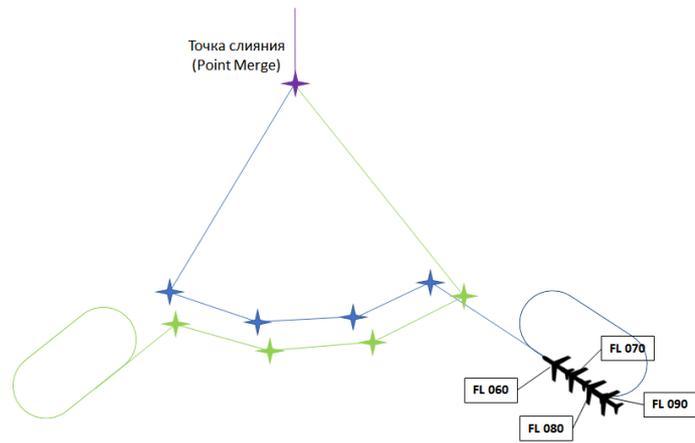


Рисунок 3.6 – Одновременное прибытие нескольких ВС с одного направления

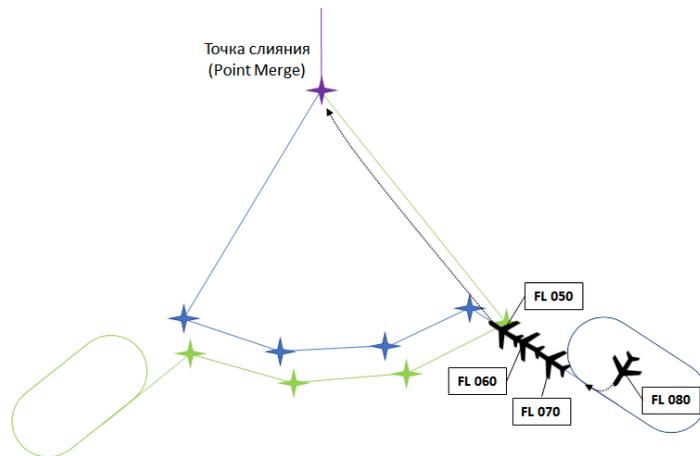


Рисунок 3.7 – Направление ВС на траекторию задержки на нескольких доступных эшелонах и постановка их в зону ожидания, для которого отсутствует свободный эшелон на траектории задержки

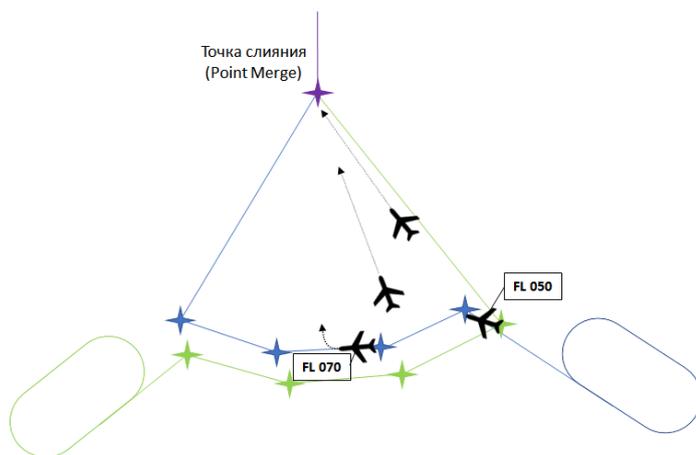


Рисунок 3.8 – Результат работы усовершенствованной системы слияния потоков

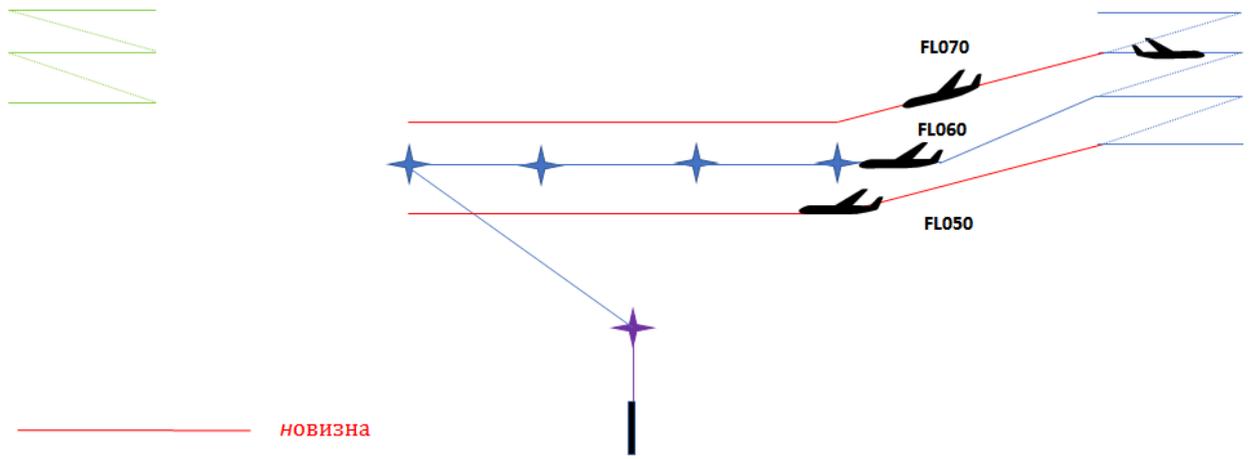


Рисунок 3.9– Вертикальный разрез расположения ВС при использовании усовершенствованной системы слияния потоков

Рассмотрим работу предлагаемого метода в условиях равномерного распределения прибывающих ВС по направлениям прибытия – рисунок 3.10.

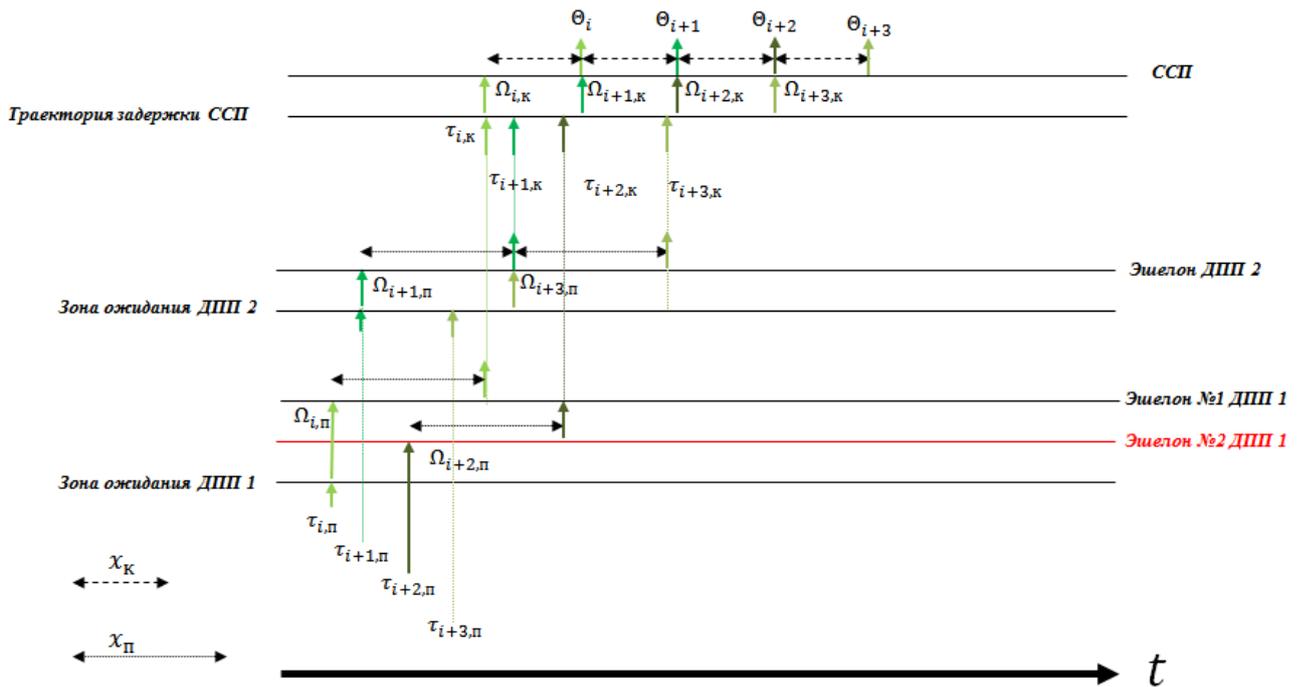


Рисунок 3.10 – Работа предлагаемого метода с использованием усовершенствованной системы слияния потоков при равномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки

Исходя из представленного распределения прибывающих ВС, можно заключить, что поток через зону ожидания ДПП 1 составляет,  $\lambda_1 = 2$ . Поток через зону ожидания ДПП 2 составляет  $\lambda_2 = 2$ , тогда следуя (3.1):

$$k = \left\lfloor \frac{3}{\frac{2}{2} + 1} \right\rfloor = 1,5 = 2, \quad l = n - k = 3 - 2 = 1$$

Таким образом, для ДПП 1 должно быть выделено – 2 эшелона полета, а для ДПП 2 - 1 эшелон полета.

ВС  $i, i+1, i+2, i+3$ , поступают в зоны ожидания ДПП с некоторой разницей по времени, меньшей, чем  $\chi_{\text{п}}$  и  $\chi_{\text{к}}$ . При этом ВС  $i$  и ВС  $i+2$  поступают в зону ожидания ДПП 1, а ВС  $i+1$  и ВС  $i+3$  в зону ожидания ДПП 2.

Так как других ВС в зоне ожидания ДПП 1 перед ВС  $i$  нет, ВС  $i$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i,\text{п}} = \tau_{i,\text{п}}$ .

Аналогично ситуация развивается с ВС  $i+1$  в зоне ожидания ДПП 2,  $\Omega_{i+1,\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}}$ .

ВС  $i+2$  попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, однако эшелон №2 оказывается свободным, в результате ВС  $i+2$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i+2,\text{п}} = \tau_{i+2,\text{п}}$ .

ВС  $i+3$ , попадает в зону ожидания ДПП 2, когда ВС  $i+1$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, в результате ВС  $i+3$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i+3,\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$ .

ВС  $i$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков первым, во время  $\tau_{i,\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$  и имеет возможность следовать прямо на точку слияния, в результате  $\Omega_{i,\text{к}} = \tau_{i,\text{к}}$ , а время  $\Theta_i = \Omega_{i,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+1$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+1,\text{к}} = \Omega_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, за предыдущим ВС  $i$  интервал на посадку еще не сформирован. ВС  $i+1$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+1,\text{к}} =$

$\Theta_i = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}}$ , время завершения формирования интервала на посадку для ВС  $i+1$  составит  $\Theta_{i+1} = \Omega_{i+1,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 2\chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+2$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+2,\text{к}} = \Omega_{i+2,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i+2,\text{п}} + \chi_{\text{п}}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, на траектории задержки все еще находится ВС  $i+1$ , которое ожидает возможности отворота на точку слияния за ВС  $i$ . ВС  $i+2$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+2,\text{к}} = \Theta_{i+1} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 2\chi_{\text{к}}$ , т.е. когда предыдущее ВС  $i+2$  достигнет точки завершения формирования интервала. Время завершения формирования интервала для ВС  $i+2$  составит  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 2\chi_{\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 3\chi_{\text{к}}$ .

ВС  $i+3$  выходит в точку выхода на траекторию задержки во время  $\tau_{i+3,\text{п}} = \Omega_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}} + 2\chi_{\text{п}}$ , в этот момент на траектории задержки находится ВС  $i+2$ , которое пока не выполняет отворот на точку слияния, так как ожидает формирования интервала за ВС  $i+1$ , соответственно ВС  $i+3$  выполняет полет по траектории задержки. Отворот ВС  $i+3$  с траектории задержки будет возможен во время  $\Omega_{i+3,\text{к}} = \Theta_{i+2} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 3\chi_{\text{к}}$ , тогда время завершения формирования интервала для ВС  $i+3$  составит  $\Theta_{i+3} = \Omega_{i+3,\text{к}} + \chi_{\text{к}} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 4\chi_{\text{к}}$ .

В результате, время завершения формирования интервала для каждого ВС можно выразить для этой ситуации как:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + \chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 2\chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 3\chi_{\text{к}} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,\text{п}} + \chi_{\text{п}} + 4\chi_{\text{к}} \end{cases} \quad (3.21)$$

Рассмотрим ситуацию, при которой поток прибывающих ВС имеется с обоих направлений, но поток с одного из направлений значительно превышает интенсивность потока с другого направления – рисунок 3.11. Поток прибывающих ВС, через зону ожидания ДПП 1 составляет,  $\lambda_1 = 3$ . Поток через зону ожидания ДПП 2 составляет  $\lambda_2 = 1$ , тогда следуя (3.1):

$$k = \left\lfloor \frac{3}{\frac{1}{3} + 1} \right\rfloor = 2,25 = 2, \quad l = n - k = 3 - 2 = 1$$

Таким образом, для ДПП 1 должно быть выделено – 2 эшелона полета, а для ДПП 2 - 1 эшелон полета.

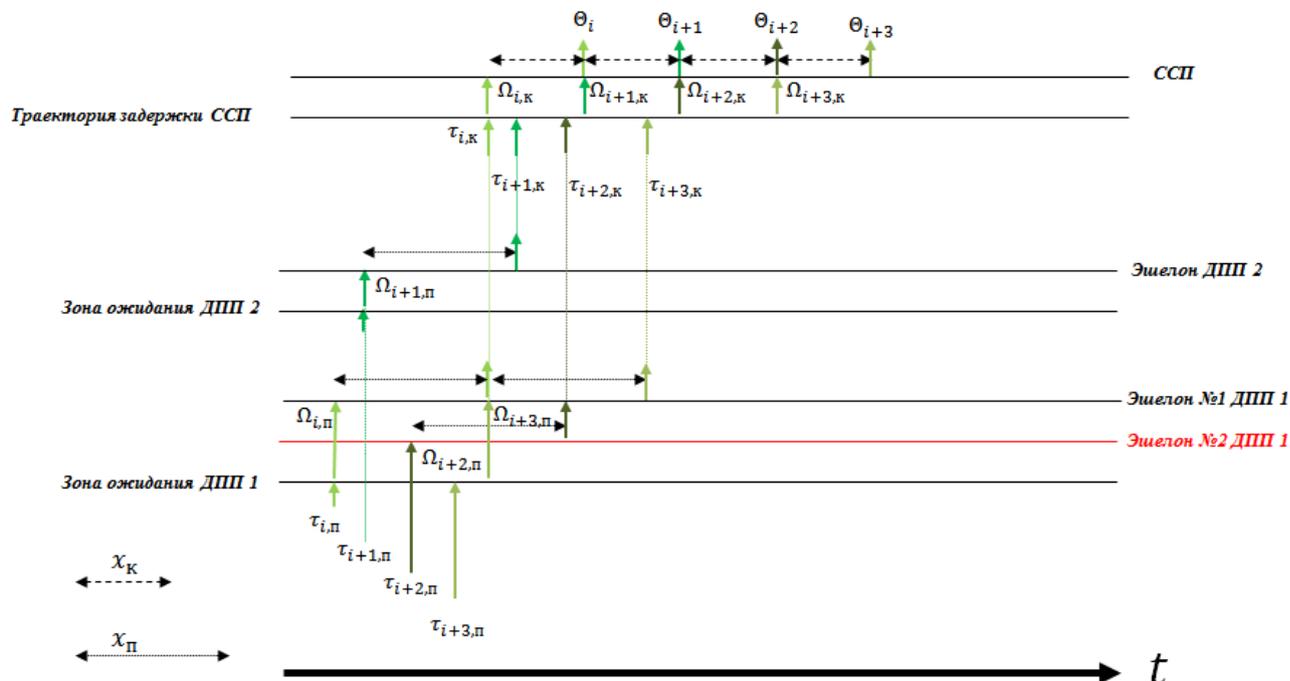


Рисунок 3.11 – Работа предлагаемого метода с использованием усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки, когда поток ВС с одного из направлений прибытия значительно меньше другого

ВС  $i, i+1, i+2, i+3$ , поступают в зоны ожидания ДПП с некоторой разницей по времени, меньшей, чем  $\chi_{\text{п}}$  и  $\chi_{\text{к}}$ . При этом ВС  $i$ , ВС  $i+2$  и ВС  $i+3$  поступают в зону ожидания ДПП 1, а ВС  $i+1$  в зону ожидания ДПП 2.

Так как других ВС в зоне ожидания ДПП 1 перед ВС  $i$  нет, ВС  $i$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i,\text{п}} = \tau_{i,\text{п}}$ .

Аналогично ситуация развивается с ВС  $i+1$  в зоне ожидания ДПП 2,  $\Omega_{i+1,\text{п}} = \tau_{i+1,\text{п}}$ .

ВС  $i+2$  попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  еще находится на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию

задержки, однако эшелон №2 оказывается свободным, в результате ВС  $i+2$  сразу же поступает на точку выхода из зоны ожидания, таким образом  $\Omega_{i+2,п} = \tau_{i+2,п}$ .

ВС  $i+3$ , попадает в зону ожидания ДПП 1, когда ВС  $i$  и ВС  $i+2$  еще находятся на участке, между точкой выхода из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки, свободных эшелонов нет, в результате ВС  $i+3$  выполняет полет в зоне ожидания и может выйти из зоны ожидания только во время  $\Omega_{i,п} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$ , т.е. когда эшелон полета №1 будет свободен.

ВС  $i$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков первым, во время  $\tau_{i,к} = \tau_{i,п} + \chi_{п}$  и имеет возможность следовать прямо на точку слияния, в результате  $\Omega_{i,к} = \tau_{i,к}$ , а время  $\Theta_i = \Omega_{i,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ .

ВС  $i+1$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+1,к} = \Omega_{i+1,п} + \chi_{п} = \tau_{i+1,п} + \chi_{п}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, за предыдущим ВС  $i$  интервал на посадку еще не сформирован. ВС  $i+1$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+1,к} = \Theta_i = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к}$ , время завершения формирования интервала на посадку для ВС  $i+1$  составит  $\Theta_{i+1} = \Omega_{i+1,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ .

ВС  $i+2$  выходит на траекторию задержки системы слияния потоков во время  $\tau_{i+2,к} = \Omega_{i+2,п} + \chi_{п} = \tau_{i+2,п} + \chi_{п}$  но, не имеет возможности следовать сразу же на точку слияния так как, на траектории задержки все еще находится ВС  $i+1$ , которое ожидает возможности отворота на точку слияния за ВС  $i$ . ВС  $i+2$  сможет покинуть траекторию задержки во время  $\Omega_{i+2,к} = \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к}$ , т.е. когда предыдущее ВС  $i+2$  достигнет точки завершения формирования интервала. Время завершения формирования интервала для ВС  $i+2$  составит  $\Theta_{i+2} = \Omega_{i+2,к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к} + \chi_{к} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к}$ .

ВС  $i+3$  выходит в точку выхода на траекторию задержки во время  $\tau_{i+3,п} = \Omega_{i,п} + \chi_{п} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{п} = \tau_{i,п} + 2\chi_{п}$ , в этот момент на траектории задержки находится ВС  $i+2$ , которое пока не выполняет отворот на точку слияния, так как ожидает формирования интервала за ВС  $i+1$ , соответственно ВС  $i+3$  выполняет полет по траектории задержки. Отворот ВС  $i+3$  с траектории задержки будет

возможен во время  $\Omega_{i+3,k} = \Theta_{i+2} = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + 3\chi_{K}$ , тогда время завершения формирования интервала для ВС  $i+3$  составит  $\Theta_{i+3} = \Omega_{i+3,k} + \chi_{K} = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + 4\chi_{K}$ .

В результате, время завершения формирования интервала для каждого ВС можно выразить для этой ситуации как:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + \chi_{K} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + 2\chi_{K} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + 3\chi_{K} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,\Pi} + \chi_{\Pi} + 4\chi_{K} \end{cases} \quad (3.22)$$

Можно сделать вывод о том, что метод организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков одинаково эффективно может быть использован как при равномерном, так и при неравномерном распределении прибывающих ВС по направлениям прибытия.

Таким образом, разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков, *отличающийся* возможностью использования нескольких эшелонов для полета на каждой из траекторий задержки. При этом занятые эшелоны становятся недоступными для ВС, поступающих на другие траектории задержки (точки входа на траекторию задержки). В таком случае появляется возможность выхода на траекторию задержки с одного направления с горизонтальным интервалом менее допустимого, так как полет выполняется на ином эшелоне. Для работоспособности метода доступные для полета эшелоны перераспределяются между траекториями задержки. Перераспределение доступных для полета эшелонов по траекториям задержки определяется на основе анализа данных об интенсивности движения с каждого направления прибытия. Для перераспределения эшелонов используется зависимость, представленная формулой (3.1):

$$k = \left[ \frac{n}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1} \right], n = const, l = n - k,$$

Реализация разработанного метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков достигается сведущим порядком действий диспетчера УВД:

1. Анализируя планируемые прибытия по списку прибывающих ВС, диспетчер УВД, определяет превалирующее направление прибытий на предстоящий период работы, например, 30 минут или 60 минут.

При превышении количества прибытий с одного направления над количеством прибытий с другого направления, диспетчер УВД принимает решение использовать один эшелон, например, 50 для организации воздушного движения прибывающих ВС с направления с наименьшим числом, прибывающих ВС. С другого направления использует два эшелона, например 60 и 70.

Если поток прибытий полностью равномерен, распределение количества эшелонов для каждой точки входа на траекторию задержки – непринципиально.

Если поток ВС с одного из направлений прибытия отсутствует, диспетчер УВД принимает решение использовать все три эшелона 50, 60 и 70 для одного направления прибытий.

2. При прибытии ВС к началу зоны ожидания диспетчер УВД направляет первые три ВС (по количеству эшелонов) на точки входа траектории задержки, назначая эшелоны, в соответствии с ранее определенными эшелонами.

3. При освобождении одного из эшелонов, диспетчер УВД направляет очередное ВС на точку входа на траекторию задержки с использованием освобожденного эшелона.

### Выводы по главе 3

1. Разработана модель усовершенствованной ССП, позволяющая нивелировать недостатки традиционной ССП. В результате исследования усовершенствованной ССП показана возможность увеличения пропускной способности на величину до 70 % (с учетом предельной пропускной способности

ВПП 48 ВС/час) при предельно неравномерном распределении прибывающих ВС по точкам входа, в сравнении с традиционной ССП.

2. Установлено, что использование модели усовершенствованной ССП при неравномерном распределении прибывающих ВС, позволяет существенно повысить пропускную способность и сократить среднее время ожидания, что потенциально позволит:

- снизить расход топлива ВС;
- сократить выбросы загрязняющих атмосферу веществ;
- уменьшить вероятность ухода ВС на запасной аэродром.

Исследование, связанное с определением фактической степени снижения расхода топлива и сокращения выбросов, загрязняющих атмосферу веществ, представлено в главе 4.

3. Применение предложенной усовершенствованной ССП будет наиболее эффективно на тех аэродромах, где потоки прибывающих ВС неравномерно распределены по точкам входа.

4. Предложен метод организации воздушного движения прибывающих ВС, исключающий простои, связанные с формированием заданных интервалов на посадку, в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих ВС по направлениям прибытия.

Новизна предлагаемого метода организации воздушного движения прибывающих ВС в сравнении с прототипом заключается в использовании нескольких эшелонов на траектории задержки. В случае неравномерного распределения прибывающих ВС по направлениям прибытия, доступные эшелоны для полета динамически перераспределяют между точками входа траектории задержки, в соответствии с условием (3.1):

$$k = \left[ \frac{n}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1} \right], n = \text{const}, l = n - k$$

В соответствии с этим выражением, при  $n = 3$ :

$$\text{если } \lambda_1 = 0, \text{ то } k = 0, l = 3$$

если  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 0$ , то  $k = 3, l = 0$

если  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq 1$ , то  $k = 2, l = 1$

если  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} > 1$ , то  $k = 1, l = 2$

5. Предложен порядок действий диспетчера УВД, который позволяет реализовать разработанный метод организации воздушного движения прибывающих ВС при непосредственном УВД.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ТРЕНАЖЕРА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **4.1. Моделирование усовершенствованной системы слияния потоков с использованием диспетчерского тренажёра**

Для подтверждения полученных в результате исследования данных проведено моделирование с использованием комплексного диспетчерского тренажера «Галактика».

В ходе моделирования последовательно применялись методы организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков, в условиях равномерного и неравномерного распределения потоков прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки.

#### **4.1.1. Измеряемые параметры и исходные данные для моделирования с использованием диспетчерского тренажера**

В ходе моделирования определялись значения сформированных диспетчером УВД интервалов на посадку, а также показатели, связанные с трудоемкостью работы диспетчера УВД, такие как количество сеансов радиосвязи и коэффициент загрузки диспетчера УВД [79 – 86]. На основании полученных в результате экспериментов данных, рассчитаны показатели, связанные с пропускной способностью и эффективностью выполнения полетов (дополнительный расход топлива).

Для определения показателей, связанных с эффективностью выполнения полетов при равномерном и неравномерном распределении потоков прибывающих ВС между точками входа оценивалось соответствие сформированных интервалов на посадку, заданному значению интервала на

посадку. Оптимальной является ситуация, в которой сформированный интервал на посадку между каждой парой заходящих ВС полностью соответствует заданному интервалу на посадку. Если сформированный интервал на посадку окажется выше заданного интервала, это будет означать избыток формирования интервала (наличие непроизводительного налета) по вине органа ОВД. Некоторый непроизводительный налет при формировании заданного интервала на посадку неизбежен, так как диспетчер УВД, формируя интервалы, близкие к минимуму нормы эшелонирования, всегда обеспечивает некоторый запас.

Для каждого из экспериментов рассчитаем сумму разностей между фактически созданным интервалом на посадку  $L_{\text{посфакт}i}$  и заданным интервалом на посадку  $L_{\text{пос}}$  для каждой пары ВС, что будет представлять собой непроизводительный налет (потери при формировании интервала), образовавшийся в результате формирования интервалов на посадку:

$$L_{\Sigma\text{-потерь}j} = \sum_{i=1}^k L_{\text{посфакт}i} - L_{\text{пос}} * k, \quad (4.1)$$

где  $L_{\text{посфакт}i}$  – фактический интервал на посадку между  $i$  – ой парой ВС;

$L_{\text{пос}}$  – допустимый горизонтальный интервал на посадку;

$k$  – количество пар ВС заходящих на посадку.

При проведении эксперимента допустимый интервал на посадку:

$$L_{\text{пос}} = L_{\text{адо}} = 5\text{км}.$$

Для определения загруженности диспетчера ДПП при использовании разных методик определено количество сеансов радиосвязи  $K_{p/c}$ , а также загруженность диспетчера ДПП по ведению радиосвязи. Количество сеансов радиосвязи  $K_{p/cj}$  в каждом  $j$ -ом эксперименте, определяется как количество законченных циклов передачи информации между абонентами: «передача указания – подтверждение» или «запрос – передача разрешения – подтверждение».

Загруженность диспетчера ДПП по ведению радиосвязи определена как отношение времени, затраченного диспетчером ДПП на ведение радиосвязи  $T_{p/cj}$ , к анализируемому периоду времени, т.е. временем проведения эксперимента  $T_э$ ,

которое будет равным для всех экспериментов. При этом  $T_3$  следует выбирать равным наибольшему времени, затраченному на решение задачи по выводу ВС на входные точки траектории задержки диспетчером ДПП. Таким образом, можно рассчитать коэффициент загруженности диспетчера ДПП при проведении каждого из экспериментов по формуле 4.2:

$$K_{эj} = \frac{T_{p/cj}}{T_3} \quad (4.2)$$

Исходные параметры при проведении экспериментов при моделировании на диспетчерском тренажере представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Исходные параметры при проведении экспериментов

Обозначение эксперимента	Количество ВС поступающих на траектории	Распределение ВС по точкам входа на траекторию задержки	Метод организации воздушного движения прибывающих ВС
Э <sub>1</sub>	4	равномерное	традиционный
Э <sub>2</sub>	4	неравномерное	традиционный
Э <sub>3</sub>	4	равномерное	усовершенствованный
Э <sub>4</sub>	4	неравномерное	усовершенствованный

Расположение ВС перед входом на траекторию задержки показано на рисунках 4.1 и 4.2.

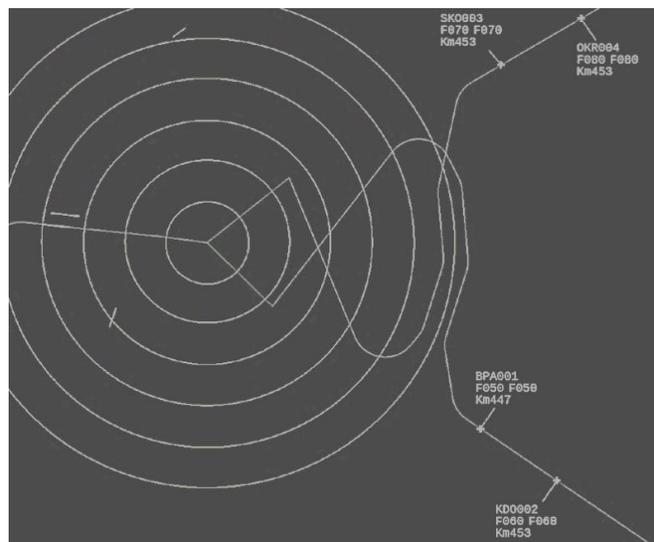


Рисунок 4.1 – Расположение воздушных судов перед входом на траекторию задержки при проведении экспериментов Э<sub>1</sub> и Э<sub>3</sub>

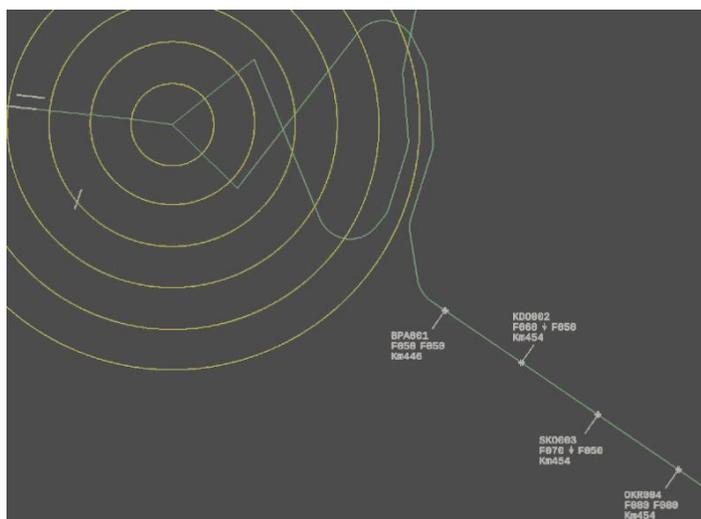


Рисунок 4.2– Расположение воздушных судов перед входом на траекторию задержки при проведении экспериментов Э<sub>2</sub> и Э<sub>4</sub>

#### 4.1.2. Особенности проведения моделирования с использованием диспетчерского тренажера

При проведении эксперимента 1 ВС распределялись равномерно между точками входа, при входе в зону ответственности диспетчера ДПП воздушные суда каждой пары располагались на дистанции менее нормы горизонтального интервала эшелонирования. При проведении эксперимента 2 все воздушные суда следовали только на одну из входных точек, при входе в зону ответственности диспетчера ДПП все 4 воздушных судна не имели между собой горизонтального интервала. Диспетчер ДПП выполнял задачу создания горизонтального интервала на точку входа соответствующей траектории задержки, используя векторение или применяя зону ожидания с последующим указанием о следовании прямо на точку входа соответствующей траектории задержки.

При проведении экспериментов оценивались, в том числе, методы, применяемые диспетчерами УВД для вывода ВС на входные точки траектории задержки, при этом можно выделить две закономерности:

1. При использовании метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков, для обеспечения вывода ВС на точку входа траектории задержки на одном эшелоне,

диспетчер ДПП применял практически весь набор инструментов позволяющий достичь требуемого продольного интервала между ВС, следующими на траекторию задержки. Диспетчер ДПП активно применял регулирование приборной скорости и векторение для формирования интервала между конкретной парой ВС, при этом для ВС, которое очевидно конфликтует сразу с несколькими другими ВС, применялась постанова в вираж (орбиту).

2. При использовании метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков, для обеспечения вывода ВС на точку входа траектории задержки на разных эшелонах диспетчер ДПП применял в основном ступенчатое снижение. При этом применялось задание конкретных значений вертикальной скорости в целях минимизации дополнительных связей, когда экипаж запрашивает дальнейшее снижение при подходе к заданному эшелону.

Таким образом, для организации воздушного движения прибывающих ВС при использовании традиционной или усовершенствованной систем слияния потоков формировались разные задачи непосредственного УВД. Это привело к использованию разных методов обеспечения заданных условий, что показало существенную разницу в загруженности диспетчера ДПП при выполнении задачи по обеспечению вывода прибывающих ВС на траектории задержки системы слияния потоков.

#### 4.1.3. Результаты проведенного моделирования с использованием диспетчерского тренажера

Данные, полученные при проведении экспериментов в рамках моделирования на диспетчерском тренажере, представлены в таблице 4.2.

При использовании метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков суммарные потери при формировании интервала на посадку при равномерном распределении прибывающих ВС (эксперимент Э<sub>1</sub>) составили 3,5 км. В случае

неравномерного распределения прибывающих ВС (эксперимент Э<sub>2</sub>) использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков привело к увеличению потерь почти в 5 раз.

Таблица 4.2 – Сводная таблица данных, полученных в ходе проведения экспериментов

Эксперимент	Суммарные потери при формировании интервала на посадку $L_{\Sigma\_потерь\_j}$ , КМ	Количество сеансов радиосвязи, $K_{p/c\_j}$	Коэффициент загрузки, $K_{эj}$	Время решения задачи, $T_{эj}$ , мин
Э <sub>1</sub>	3,5	23	0,27	10:09
Э <sub>2</sub>	16,5	33	0,34	13:38
Э <sub>3</sub>	3,8	16	0,18	07:52
Э <sub>4</sub>	3,9	27	0,25	08:26

Такой большой рост значения непроизводительного налета обуславливается тем, что у диспетчера, отвечающего за создание интервалов на посадку уже не было возможности создать единый поток прибывающих воздушных судов с интервалами, приближенными к  $L_{адо}$ , так как ВС, при входе на траекторию задержки уже имели интервал, значительно превышающий требуемый интервал на посадку.

При использовании метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков диспетчер ДПП использовал назначение разных эшелонов полета, вместо создания заданных горизонтальных интервалов. В результате, полученные значения непроизводительного налета, оказались практически одинаковыми как для равномерного (эксперимент Э<sub>3</sub>), так и для неравномерного (эксперимент Э<sub>4</sub>) распределения прибывающих ВС.

Эксперименты подтвердили наличие больших значений непроизводительного налета при формировании интервала на посадку в

результате действий диспетчера ДПП при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков. Фактически, траектория задержки системы слияния потоков не использовалась, так как достаточный интервал на посадку уже был создан при подходе воздушных судов к входной точке. Результаты эксперимента подтверждают вывод о неэффективности использования метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков для случаев, когда потоки прибывающих ВС распределены неравномерно.

Определим показатели пропускной способности и дополнительного расхода топлива по результатам моделирования на диспетчерском тренажере.

Фактическую пропускную способность прибытий на ВПП найдем, используя формулу (2.5), однако вместо величины  $L_{\text{адо}}$ , используем среднее значение фактически сформированного интервала на посадку  $L_{\text{посфакт\_ср}}$ . Тогда для расчета пропускной способности формула примет вид:

$$\mu_{\text{вп\_пос\_Э}_j} = W_{\text{глисс}} / L_{\text{посфакт\_ср\_Э}_j} \quad (4.3)$$

В каждом из экспериментов использовалось по 4 прибывающих ВС, которые образовывали 3 пары прибывающих ВС, между которыми требовалось создать интервал. Тогда, для каждого  $j$  – го эксперимента средний сформированный интервал на посадку найдем по формуле:

$$L_{\text{посфакт\_ср\_Э}_j} = \frac{L_{\Sigma_{\text{посфакт\_Э}_j}}}{3} \quad (4.4)$$

Полученные данные представлены в таблице 4.3

Дополнительный расход топлива ВС при формировании интервалов на посадку  $Q_{\text{доп\_Э}_j}$  определяется как топливо, затраченное на полет по дистанции, соответствующей количеству суммарных потерь (непроизводительного налета)  $L_{\Sigma_{\text{потерь\_Э}_j}}$  в ходе  $j$  – го эксперимента. Для упрощения расчетов, предположим, что все ВС в эксперименте являются ВС типа Ту-204, и соответственно имеют идентичный часовой расход топлива  $Q_{\text{Т204}} =$

3700 кг/час. Найдем дополнительный расход топлива для каждого эксперимента по формуле:

$$Q_{\text{доп\_Э}_j} = \frac{L_{\Sigma\text{-потерь\_Э}_j}}{W_{\text{глисс}}} * Q_{\text{Т204}} \quad (4.5)$$

Таблица 4.3 – Рассчитанная пропускная способность ВПП при использовании традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков

Эксперимент	Суммарный сформированный интервал на посадку $L_{\Sigma\text{-посфакт\_Э}_j}$ , КМ	Средний сформированный интервал на посадку $L_{\text{посфакт\_ср\_Э}_j}$ , КМ	Пропускная способность ВПП, $\mu_{\text{вп\_пос\_Э}_j}$ , ВС/час
Э <sub>1</sub>	18,5	6,2	38
Э <sub>2</sub>	31,5	10,5	22
Э <sub>3</sub>	18,8	6,3	38
Э <sub>4</sub>	18,9	6,3	38

Полученные данные о дополнительном расходе топлива представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Дополнительный расход топлива, рассчитанный по результатам проведенных экспериментов

Эксперимент	Суммарные потери при формировании интервала на посадку $L_{\Sigma\text{-потерь}_j}$ , КМ	Дополнительный расход топлива, $Q_{\text{доп\_Э}_j}$ , КГ
Э <sub>1</sub>	3,5	54
Э <sub>2</sub>	16,5	254
Э <sub>3</sub>	3,8	59
Э <sub>4</sub>	3,9	60

#### 4.1.4. Выводы по результатам проведенного моделирования с использованием диспетчерского тренажера

1. Моделированием с применением диспетчерского тренажера установлена неэффективность использования метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков, при неравномерном распределении прибывающих ВС по точкам входа.

2. Показано повышение эффективности аэронавигационного обеспечения при заходе на посадку при использовании усовершенствованной системы слияния потоков и отмечено преимущество усовершенствованной системы слияния потоков в сравнении с традиционной системой слияния потоков.

3. Определена фактическая пропускная способность методов организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной и усовершенствованной систем слияния потоков. Показано, что при применении усовершенствованной системы слияния потоков в условиях неравномерного распределения прибывающих ВС по точкам входа достигается рост пропускной способности на 73 %.

4. Показано, что применение усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС позволяет сократить дополнительный расход топлива на величину до 70 %.

5. Установлено, что применение усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС позволяет сократить количество сеансов радиосвязи на величину от 18 до 30 % и снизить загруженность диспетчеров УВД на величину от 26 до 33 %.

Таким образом, можно заключить, что результаты моделирования с использованием диспетчерского тренажера подтверждают расчетные результаты исследований.

## 4.2. Оценка эффективности метода организации воздушного движения прибывающих воздушных судов и использованием усовершенствованной системы слияния потоков

К показателям эффективности, позволяющим оценить преимущества внедрения предлагаемого метода организации воздушного движения прибывающих ВС, в соответствии с [87 – 96] относятся:

- показатели, связанные с пропускной способностью;
- показатели, связанные с эффективностью выполнения полетов;
- показатели, связанные с охраной окружающей среды;
- показатели, связанные со стоимостью выполнения полетов.

### 4.2.1. Пропускная способность

В качестве показателей, связанных с пропускной способностью используется показатель пропускной способности, выраженный в количестве посадочных операций на ВПП за час полетов. На пропускную способность метода организации воздушного движения прибывающих ВС влияют пропускные способности воздушного пространства посадочной прямой  $\mu_{\text{вп\_пос}}$ , пропускная способность системы слияния потоков  $\mu_{\text{ссп}}$  и пропускная способность зон ожидания диспетчерских пунктов подхода,  $\mu_{\text{дпп1}}$  и  $\mu_{\text{дпп2}}$ .

Пределом пропускной способности воздушного пространства посадочной прямой является максимальное количество прибывающих ВС, которое может пройти через порог ВПП за единицу времени. Для целей настоящей работы используется интервал горизонтального эшелонирования при диспетчерском обслуживании подхода  $L_{\text{адо}} = 5$  км, при скорости ВС на глиссаде  $W_{\text{глисс}} = 240$  км/час данное значение определяется по формуле (2.5):

$$\mu_{\text{вп\_пос}} = \frac{W_{\text{глисс}}}{L_{\text{адо}}} = \frac{240}{5} = 48 \text{ ВС/час}$$

Пропускная способность зон ожидания ДПП ( $\mu_{\text{дпп1}}$  и  $\mu_{\text{дпп2}}$  соответственно) в традиционной системе слияния потоков, будет представлять собой предельное количество ВС, которое могут покинуть зону ожидания ДПП на одном эшелоне. Тогда пропускная способность ДПП будет зависеть от интервала эшелонирования при диспетчерском обслуживании подхода  $L_{\text{доп}} = 10$  км, а также скорости полета перед входом на траекторию задержки, которая будет соответствовать оптимальной скорости ожидания. При этом следует учесть потери интервала эшелонирования при выполнении разворота на траектории задержки, который составляет 90 градусов, тогда, потребный интервал горизонтального эшелонирования  $L_{\text{тз}}$  с учетом потери интервала в развороте составляет  $L_{\text{тз}} = 14,2$  км.

Для расчета пропускной способности зоны ожидания ДПП используем формулу (2.6), с учетом  $L_{\text{тз}} = 14,2$  км и скорости полета по траектории задержки  $W_{\text{тз}} = 400$  км/час рассчитаем пропускную способность каждой из зон ожидания ДПП

$$\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = \frac{W_{\text{тз}}}{L_{\text{тз}}} = \frac{400}{14,2} = 28,17 = 28 \text{ ВС/час}$$

Суммарная пропускная способность ДПП, при использовании традиционной системы слияния потоков, составит (формула 2.7):

$$\mu_{\text{дпп_т}} = \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}} = 56 \text{ ВС/час}$$

Пропускная способность метода организации воздушного движения прибывающих ВС при использовании традиционной системы слияния потоков будет соответствовать минимуму из пропускных способностей (формула 2.8):

$$\mu_{\text{тссп}} = \min(\mu_{\text{вп_пос}}, \mu_{\text{дпп_т}}) = 48 \text{ ВС/час}$$

Однако, при применении метода с использованием традиционной системы слияния потоков существует ограничение, связанное с пропускной способностью зон ожидания, расположенных на каждом входном направлении прибытий системы слияния потоков, таким образом, пропускная способность при использовании традиционной системы слияния потоков будет располагаться в пределах:  $28 \leq \mu_{\text{тссп}} \leq 48$ . Пропускная способность метода организации

воздушного движения прибывающих ВС выражается системой уравнений (формула 2.9):

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 48 \\ \lambda_1 \leq 28 \\ \lambda_2 \leq 28 \end{cases}$$

Пропускная способность зон ожидания диспетчерского пункта подхода, усовершенствованной системы слияния потоков, будет зависеть от количества используемых эшелонов, на которые можно вывести ВС из зоны ожидания ДПП. Тогда,

$$\mu_{\text{дпп}_y} = \mu_{\text{дпп}} * n, \quad (4.6)$$

где  $n$  – общее количество доступных эшелонов на траекториях задержки;

Рассчитаем пропускную способность усовершенствованной системы слияния потоков с учетом  $L_{\text{ТЗ}} = 14,2$  км и скорости полета по траектории задержки  $W_{\text{ТЗ}} = 400$  км/час, примем количество эшелонов используемых на траектории задержки  $n = 3$ .

$$\mu_{\text{дпп}_y} = \mu_{\text{дпп}} * n = \frac{W_{\text{ТЗ}}}{L_{\text{ТЗ}}} * 3 = \frac{400}{14,2} * 3 = 84,51 = 84 \text{ ВС/час}$$

Пропускная способность метода организации воздушного движения прибывающих ВС при использовании усовершенствованной системы слияния потоков будет соответствовать минимуму из пропускных способностей:

$$\mu_{\text{уссп}} = \min(\mu_{\text{вп}_\text{пос}}, \mu_{\text{дпп}_y}) = 48 \text{ ВС/час},$$

В связи с неравномерностью потоков прибывающих ВС определить показатель пропускной способности метода организации воздушного движения прибывающих ВС при использовании традиционной системы слияния потоков  $\mu_{\text{тссп}}$ , и ожидаемым соотношением между потоками прибывающих ВС, следует за каждый  $j$ -й час полетов на аэродроме.

$$\mu_{\text{тссп}j} = \begin{cases} \lambda_{1j} + \lambda_{2j} = \mu_{\text{вп}_\text{пос}} = 48 \\ \lambda_{1j} \leq \mu_{\text{дпп}} = 28 \\ \lambda_{2j} \leq \mu_{\text{дпп}} = 28 \end{cases} \quad (4.7)$$

Таким образом, расчетная пропускная способность  $\mu_{\text{тссп}}$  будет зависеть от отношения интенсивности прибывающих потоков ВС  $\lambda_{1j}$  и  $\lambda_{2j}$ :

если  $\lambda_{1j} \leq \lambda_{2j}$

$$\mu_{\text{тссп}j} = \mu_{\text{дпп}} * \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_{2j}}\right) + \mu_{\text{дпп}} \leq \mu_{\text{вп\_пос}} = 48 \text{ ВС/час} \quad (4.8)$$

$$\mu_{\text{тссп}j} = 28 * \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_{2j}}\right) + 28 \leq 48 \text{ ВС/час}$$

если  $\lambda_{2j} \leq \lambda_{1j}$

$$\mu_{\text{тссп}j} = \mu_{\text{дпп}} * \left(\frac{\lambda_{2j}}{\lambda_{1j}}\right) + \mu_{\text{дпп}} \leq \mu_{\text{вп\_пос}} = 48 \text{ ВС/час} \quad (4.9)$$

$$\mu_{\text{тссп}j} = 28 * \left(\frac{\lambda_{2j}}{\lambda_{1j}}\right) + 28 \leq 48 \text{ ВС/час}$$

Показатель пропускной способности метода организации воздушного движения прибывающих ВС при использовании усовершенствованной системы слияния потоков  $\mu_{\text{уссп}}$  не зависит от распределения потоков прибывающих ВС по направлениям прибытий, таким образом,

$$\mu_{\text{уссп}j} = \mu_{\text{уссп}} = \mathbf{const} = \mathbf{48} \quad (4.10)$$

Рассчитаем пропускные способности методов организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной и усовершенствованной систем слияния потоков, при условии сохранения неравномерности распределения потоков прибывающих ВС на прежнем уровне. Данные о существующей неравномерности потоков прибывающих ВС представлены в разделе 1.

Для аэродромов Санкт-Петербург (Пулково), Екатеринбург (Кольцово), Новосибирск (Толмачево), Калининград (Храброво) рассчитанные значения пропускной способности представлены в таблицах 4.5 – 4.8.

Таблица 4.5 – Расчетная пропускная способность, при условии сохранения неравномерности потоков прибывающих ВС на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково)

Час, УТЦ	$\lambda_1$ , ВС/час	$\lambda_2$ , ВС/час	$\frac{\lambda_{\text{меньш}}}{\lambda_{\text{больш}}}$	$\mu_{\text{тссп}}$ , ВС/час	$\mu_{\text{уссп}}$ , ВС/час
00	2	0	0	28	48
01	2	1	0,5	42	48
02	0	4	0	28	48
03	5	8	0,63	45	48
04	3	7	0,43	40	48
05	3	7	0,43	40	48
06	8	5	0,63	45	48
07	5	4	0,8	48	48
08	11	4	0,36	38	48
09	5	9	0,56	43	48
10	9	8	0,89	48	48
11	8	4	0,5	42	48
12	8	2	0,25	32	48
13	11	5	0,45	40	48
14	9	3	0,33	37	48
15	12	7	0,58	44	48
16	8	4	0,5	42	48
17	14	2	0,14	32	48
18	10	6	0,6	44	48
19	12	3	0,25	35	48
20	8	6	0,75	48	48
21	7	3	0,43	40	48
22	5	0	0	28	48
23	3	2	0,67	46	48

Таблица 4.6 – Расчетная пропускная способность, при условии сохранения неравномерности потоков прибывающих ВС на аэродроме Екатеринбург (Кольцово)

Час, УТЦ	$\lambda_1$ , ВС/час	$\lambda_2$ , ВС/час	$\frac{\lambda_{\text{меньш}}}{\lambda_{\text{больш}}}$	$\mu_{\text{тссп}}$ , ВС/час	$\mu_{\text{уссп}}$ , ВС/час
00	2	2	1,00	48	48
01	2	0	0,00	28	48
02	0	0	1,00	48	48
03	1	1	1,00	48	48
04	3	3	1,00	48	48
05	1	1	1,00	48	48
06	0	3	0,00	28	48
07	4	2	0,50	42	48
08	4	1	0,25	35	48
09	3	1	0,33	37	48
10	3	3	1,00	48	48
11	3	2	0,67	46	48
12	4	0	0,00	28	48
13	1	4	0,25	35	48
14	3	1	0,33	37	48
15	0	2	0,00	28	48
16	3	2	0,67	46	48
17	4	2	0,50	42	48
18	4	0	0,00	28	48
19	5	0	0,00	28	48
20	5	1	0,20	33	48
21	2	0	0,00	28	48
22	5	1	0,20	33	48
23	7	2	0,29	36	48

Таблица 4.7 – Расчетная пропускная способность, при условии сохранения неравномерности потоков прибывающих ВС на аэродроме Новосибирск (Толмачево)

Час, УТЦ	$\lambda_1$ , ВС/час	$\lambda_2$ , ВС/час	$\frac{\lambda_{\text{меньш}}}{\lambda_{\text{больш}}}$	$\mu_{\text{тссп}}$ , ВС/час	$\mu_{\text{уссп}}$ , ВС/час
00	4	2	0,50	42	48
01	3	4	0,75	48	48
02	0	1	0,00	28	48
03	0	4	0,00	28	48
04	0	7	0,00	28	48
05	2	7	0,29	36	48
06	0	3	0,00	28	48
07	2	4	0,50	42	48
08	1	0	0,00	28	48
09	1	2	0,50	42	48
10	2	3	0,67	46	48
11	1	1	1,00	48	48
12	3	1	0,33	37	48
13	5	1	0,20	33	48
14	6	2	0,33	37	48
15	7	0	0,00	28	48
16	1	0	0,00	28	48
17	5	0	0,00	28	48
18	2	0	0,00	28	48
19	2	0	0,00	28	48
20	5	1	0,20	33	48
21	4	0	0,00	28	48
22	3	3	1,00	48	48
23	2	1	0,50	42	48

Таблица 4.8 – Расчетная пропускная способность, при условии сохранения неравномерности потоков прибывающих ВС на аэродроме Калининград (Храброво)

Час, УТЦ	$\lambda_1$ , ВС/час	$\lambda_2$ , ВС/час	$\frac{\lambda_{\text{меньш}}}{\lambda_{\text{больш}}}$	$\mu_{\text{тссп}}$ , ВС/час	$\mu_{\text{уссп}}$ , ВС/час
00	0	1	0,00	28	48
01	0	0	1,00	48	48
02	0	0	1,00	48	48
03	0	0	1,00	48	48
04	0	0	1,00	48	48
05	0	1	0,00	28	48
06	0	3	0,00	28	48
07	1	3	0,33	37	48
08	0	6	0,00	28	48
09	0	5	0,00	28	48
10	0	2	0,00	28	48
11	0	3	0,00	28	48
12	0	3	0,00	28	48
13	0	5	0,00	28	48
14	0	3	0,00	28	48
15	0	1	0,00	28	48
16	0	4	0,00	28	48
17	0	4	0,00	28	48
18	0	2	0,00	28	48
19	0	3	0,00	28	48
20	0	0	1,00	48	48
21	0	0	1,00	48	48
22	0	0	1,00	48	48
23	0	1	0,00	28	48

В результате анализа полученных данных можно сделать вывод о значительном повышении пропускной способности при использовании, метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков.

Данный эффект достигается благодаря тому, что пропускная способность зон ожидания ДПП в усовершенствованной системе слияния потоков никак не зависит от распределения потоков прибывающих ВС. Тогда как в традиционной системе слияния потоков пропускная способность зон ожидания диспетчерского пункта значительно зависит от равномерности потоков прибывающих ВС.

#### 4.2.2. Эффективность выполнения полетов

##### 4.2.2.1. Дополнительное полетное время в воздушном пространстве узлового диспетчерского района

Дополнительное полетное время представляет собой время, которое ВС дополнительно находится в пространстве узлового диспетчерского района в зонах ожидания, по причине того, что не может следовать к посадочной прямой для выполнения захода на посадку.

С учетом неравномерности потоков прибывающих ВС в течение времени суток, целесообразно определить суммарное дополнительное полетное время за сутки полетов.

Суммарное дополнительное полетное время для суток полетов при применении метода организации воздушного движения с использованием традиционной системы слияния потоков  $T_{сут\_тссп}$  вычислим по формуле:

$$T_{сут\_тссп} = \sum_{j=0}^{23} T_{оч\_тсспj} * (\lambda_{1j} + \lambda_{2j}) \quad (4.10)$$

Суммарное дополнительное время для суток полетов при применении усовершенствованного метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков  $T_{\Sigma\_усп}$  вычисляется по формуле:

$$T_{\text{сут\_усп}} = \sum_{j=0}^{23} T_{\text{оч\_усп}j} * (\lambda_{1j} + \lambda_{2j}) \quad (4.11)$$

Для расчета данного показателя используется среднее время ожидания в зонах ожидания ДПП, фактически, данное время совпадает с расчетом среднего времени нахождения ВС в очереди СМО ДПП  $T_{\text{оч\_тсс}j}$ ,  $T_{\text{оч\_усп}j}$ , порядок расчета которых приведен в главе 2.

Величину среднего времени ожидания для каждого  $j$ -го часа полетов, при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков найдем по формуле (формула 3.12):

$$T_{\text{оч\_тсс}j} = \frac{1}{2(\lambda_1 + \lambda_2)} * \left( \frac{\lambda_1^2}{\mu_1(\mu_1 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_2^2}{\mu_2(\mu_2 - \lambda_2)} \right) \quad (4.12)$$

Пропускную способность точки входа на траекторию задержки примем  $\mu_1 = \mu_2 = 24$

Величину среднего времени ожидания для каждого  $j$ -го часа полетов, при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков найдем с использованием формул (3.15, 3.17, 3.19). Примем количество эшелонов, используемых в усовершенствованной системе слияния потоков равным  $n = 3$ , тогда:

$$p_j = \frac{(\lambda_{1j} + \lambda_{2j})}{\mu} \quad (4.13)$$

$$P_{0j} = \left( 1 + p_j + \frac{p_j^2}{2} + \frac{p_j^3}{6} + \frac{p_j^4}{6 * (3 - p_j)} \right)^{-1} \quad (4.14)$$

$$T_{\text{оч\_усп}j} = \frac{p_j^4 * P_{0j} * \left( 1 - \frac{p_j}{3} \right)^{-2}}{18 * (\lambda_{1j} + \lambda_{2j})} \quad (4.15)$$

Для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) рассчитанные значения дополнительного полетного времени в воздушном пространстве узлового диспетчерского района при применении методов организации воздушного движения прибывающих ВС, с использованием традиционной и усовершенствованной систем слияния потоков представлены в таблице 4.9

Таблица 4.9 – Рассчитанные значения дополнительного полетного времени в воздушном пространстве узлового диспетчерского района, аэродром Санкт-Петербург (Пулково)

Час, УТЦ	$\lambda_1 + \lambda_2$ ВС/час	$\lambda_1$ , ВС/час	$\lambda_2$ , ВС/час	$T_{оч\_тссп}$ , min	$T_{оч\_уссп}$ , min	$T_{оч\_тссп}$ * ( $\lambda_{1j}$ + $\lambda_{2j}$ )	$T_{оч\_уссп}$ * ( $\lambda_{1j}$ + $\lambda_{2j}$ )
00	2	2	0	0,1	0	0,2	0
01	3	2	1	0,1	0	0,3	0
02	4	0	4	0,25	0	1	0
03	13	5	8	0,5	0,1	6,5	1,3
04	10	3	7	0,4	0	4	0
05	10	3	7	0,4	0	4	0
06	13	8	5	0,5	0,1	6,5	1,3
07	9	5	4	0,3	0	2,7	0
08	15	11	4	0,84	0,14	12,6	2,1
09	14	5	9	0,6	0,1	8,4	1,4
10	17	9	8	0,7	0,2	11,9	3,4
11	12	8	4	0,5	0,1	6	1,2
12	10	8	2	0,5	0	5	0
13	16	11	5	0,8	0,2	12,8	3,2
14	12	9	3	0,6	0,1	7,2	1,2
15	19	12	7	1	0,3	19	5,7
16	12	8	4	0,5	0,1	6	1,2
17	16	14	2	1,6	0,2	25,6	3,2
18	16	10	6	0,7	0,2	11,2	3,2
19	15	12	3	1	0,14	15	2,1
20	14	8	6	0,5	0,1	7	1,4
21	10	7	3	0,4	0	4	0
22	5	5	0	0,3	0	1,5	0
23	5	3	2	0,15	0	0,75	0
Итого	272	168	104			179,15 min	31,9 min

$$T_{сут\_тссп} = 3 \text{ часа}$$

$$T_{сут\_уссп} = 0,53 \text{ часа}$$

В результате анализа полученных данных, можно сделать вывод, о том, что применение метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков позволяет существенно сократить дополнительное полетное время в воздушном пространстве узлового

диспетчерского района. Данный эффект, достигается в основном в те периоды времени, когда поток прибывающих ВС неравномерно распределен по направлениям прибытия. Более высокая пропускная способность позволяет в этом случае обслуживать потоки прибывающих ВС с меньшими задержками.

#### 4.2.2.2. Дополнительный расход топлива

Определим дополнительный расход топлива или, расход топлива ВС при полете в воздушном пространстве узлового диспетчерского района в пределах дополнительного полетного времени. Учитывая, что интенсивность полетов и неравномерность распределения полетов прибывающих ВС зависят от времени суток, целесообразно рассчитать данный показатель за сутки полетов.

Тогда, дополнительный расход топлива за сутки полетов при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС, с использованием традиционной системы слияния потоков  $Q_{сут\_тссп}$ , можно рассчитать по формуле:

$$Q_{сут\_тссп} = T_{сут\_тссп} * Q_{ср}, \quad (4.16)$$

где  $T_{сут\_тссп}$  – суммарное дополнительное полетное время за сутки полетов;

$Q_{ср}$  – средний часовой расхода топлива ВС за час полета

Дополнительный расход топлива за сутки полетов при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков  $Q_{сут\_уссп}$  можно рассчитать по формуле:

$$Q_{сут\_уссп} = T_{сут\_уссп} * Q_{ср}, \quad (4.17)$$

где  $T_{сут\_уссп}$  – суммарное дополнительное полетное время за сутки полетов;

$Q_{ср}$  – средний часовой расхода топлива ВС за час полета

Для определения среднего часового расхода топлива одним ВС за час полета  $Q_{ср}$ , необходимо учесть часовой расход  $Q_i$  каждого  $i$ -го типа ВС, количество выполняемых полетов ВС каждого  $i$ -го типа [97-100] за сутки

полетов  $\sum \lambda_{1ji} + \lambda_{2ji}$ . Тогда  $Q_{CP}$  для конкретного рассматриваемого аэродрома можно найти по формуле:

$$Q_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i * \sum \lambda_{1ji} + \lambda_{2ji}}{\sum \lambda_{1j} + \lambda_{2j}}, \quad (4.18)$$

где  $m$  – количество типов ВС в потоке прибывающих ВС

Результаты расчета дополнительного расхода топлива при применении методов организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) представлены в таблице 4.10

Таблица 4.10 – Рассчитанные значения дополнительного расхода топлива, аэродром Санкт-Петербург (Пулково)

Тип ВС	Количество прибывающих ВС в сутки, ИВД <sub>сут_i</sub> , шт.	Часовой расход топлива $Q_i$ , кг	$Q_i * \text{ИВД}_{\text{сут}_i}$ , кг
Boeing 737-800	66	2480	163680
Airbus 320	50	2647	145585
SSJ-100	51	2296	117096
Airbus 319	39	2518	98202
Airbus 320 neo	15	2100	31500
Airbus 321 neo	13	2200	28600
Airbus 321	12	3085	37020
CRJ2	7	1100	7700
Boeing 737-900	4	2650	10600
Boeing 737-700	3	2180	6540
Embraer-190	3	1850	5550
Boeing 737-500	1	2300	2300
Boeing 777-300ER	4	7800	31200
Airbus 330-200	2	5593	11186
Boeing 747-400F	1	11000	11000
Ту-204/214	1	3700	3700
$Q_{CP}$ , кг/час		2616	
$T_{\text{сут}_\text{тссп}}$ , час		3	
$Q_{\text{сут}_\text{тссп}}$ , кг		7848	
$T_{\text{сут}_\text{тссп}}$ , час		0,53	
$Q_{\text{сут}_\text{уссп}}$ , кг		1387	

В результате анализа полученных данных, можно сделать вывод, о том, что применение метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков позволяет существенно сократить дополнительный расход топлива при полетах в воздушном пространстве узлового диспетчерского района. Более высокая пропускная способность позволяет обслуживать потоки прибывающих ВС с меньшими задержками, что уменьшает показатели дополнительных затрат топлива.

#### 4.2.3. Охрана окружающей среды

В качестве показателей, связанных с охраной окружающей среды определены значения дополнительных выбросов загрязняющих атмосферу веществ, при применении метода организации воздушного движения с использованием традиционной системы слияния потоков и усовершенствованной системы слияния потоков.

Для расчета выбросов загрязняющих атмосферу веществ  $E$  целесообразно использовать значения индексов эмиссии  $EI$ . [101 – 103] Индекс эмиссии  $EI_z$  представляет количество  $z$ -го загрязняющего вещества в граммах, выделяющихся при сжигании 1 килограмма топлива. Таким образом, для расчета снижения уровня загрязнения атмосферы конкретным веществом необходимо использовать рассчитанные значения дополнительного расхода топлива  $Q_{сут\_тссп}$  и  $Q_{сут\_уссп}$ .

Тогда, расчет количества дополнительных выбросов конкретного загрязняющего атмосферу вещества производится по формулам:

Для метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков:

$$E_{z\_сут\_тссп} = Q_{сут\_тссп} * EI_z \quad (4.19)$$

Для метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков:

$$E_{z\_сут\_уссп} = Q_{сут\_уссп} * EI_z \quad (4.20)$$

В рамках работы рассчитаны:

Количество дополнительных выбросов углекислого газа:

$$E_{CO_2_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 3,1$$

$$E_{CO_2_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 3,1$$

Количество дополнительных выбросов угарного газа:

$$E_{CO_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 0,006$$

$$E_{CO_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 0,006$$

Количество дополнительных выбросов  $SO_2$ :

$$E_{SO_2_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 0,0025$$

$$E_{SO_2_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 0,0025$$

Количество дополнительных выбросов  $C_nH_m$ :

$$E_{C_nH_m_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 0,00015$$

$$E_{C_nH_m_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 0,00015$$

Количество дополнительных выбросов сажи:

$$E_{сажа_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 0,0001$$

$$E_{сажа_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 0,0001$$

Количество дополнительных выбросов окислов азота  $NO_x$ :

$$E_{NO_x_{тссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{тссп}} * 0,015$$

$$E_{NO_x_{уссп}}, \text{ кг/сут} = Q_{сут_{уссп}} * 0,015$$

Результаты расчета дополнительных выбросов загрязняющих атмосферу веществ, при применении методов организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково), представлены в таблице 4.11

Таблица 4.11 – Результаты расчета дополнительных выбросов загрязняющих атмосферу веществ, для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково)

Вещество	Выбросы		Эффект (снижение выбросов)
	ТССП	УССП	
CO <sub>2</sub> , кг/сут	24389	4300	20089
CO, кг/сут	47	8,3	38,7
SO <sub>2</sub> , кг/сут	20	3,47	16,53
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> , кг/сут	1,18	0,21	0,97
сажа, кг/сут	0,79	0,14	0,65
NO <sub>x</sub> , кг/сут	118	20,67	97,33

#### 4.2.4. Стоимость выполнения полетов

В качестве показателей, связанных со стоимостью выполнения полетов используется значение затрат на дополнительный расход топлива, при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС, с использованием традиционной системы слияния потоков  $\mathcal{E}_{\text{сут\_тссп}}$  и, соответственно при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков  $\mathcal{E}_{\text{сут\_уссп}}$ .

Учитывая, что среднее значение стоимости авиационного топлива  $S_{\text{ТС-1}}$  в марте 2022 года составила 67173 рубля за тонну [104], найдем стоимость расходов на дополнительный расход топлива за сутки полетов  $\mathcal{E}_{\text{сут\_тссп}}$  и  $\mathcal{E}_{\text{сут\_уссп}}$  соответственно, по формулам:

$$\mathcal{E}_{\text{сут\_тссп}} = Q_{\text{сут\_тссп}} * S_{\text{ТС-1}} \quad (4.21)$$

$$\mathcal{E}_{\text{сут\_уссп}} = Q_{\text{сут\_уссп}} * S_{\text{ТС-1}} \quad (4.22)$$

Результаты расчета стоимости дополнительного израсходованного топлива, при применении методов организации воздушного движения прибывающих ВС с

использованием традиционной и усовершенствованной системы слияния потоков для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты расчета стоимости дополнительно израсходованного топлива для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково)

$\mathcal{E}_{\text{сут\_тссп}}$ , руб	$\mathcal{E}_{\text{сут\_уссп}}$ , руб	Экономический эффект, рублей в год (грубая оценка)
527173	92564	79 млн. 316 тыс.

В результате анализа расчетов затрат на дополнительно израсходованное топливо, можно сделать вывод о том, что экономия в сутки может составлять сотни тысяч рублей.

#### Выводы по главе 4

1. Моделированием с использованием диспетчерского тренажера подтверждена неэффективность использования метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков, при неравномерном распределении прибывающих ВС по точкам входа.

2. Моделированием с использованием диспетчерского тренажера показано повышение эффективности аэронавигационного обеспечения при заходе на посадку при использовании усовершенствованной системы слияния потоков и отмечено преимущество усовершенствованной системы слияния потоков в сравнении с традиционной системой слияния потоков.

3. По результатам моделирования с использованием диспетчерского тренажера определена фактическая пропускная способность методов организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной и усовершенствованной систем слияния потоков. Показано, что при применении усовершенствованной системы слияния потоков в условиях неравномерного

распределения прибывающих ВС по точкам входа достигается рост пропускной способности на 73 %.

4. Моделированием с использованием диспетчерского тренажера установлено, что применение усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС позволяет сократить значение дополнительного расхода топлива на величину до 76 %.

5. Моделированием с использованием диспетчерского тренажера установлено, что применение усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС позволяет сократить количество сеансов радиосвязи на величину от 18 до 30 % и снизить загруженность диспетчеров УВД на величину от 26 до 33 %.

6. Результаты моделирования с использованием диспетчерского тренажера подтверждают расчетные результаты исследований.

7. Установлено, что применение усовершенствованной системы слияния потоков позволит повысить пропускную способность на многих аэродромах, где существует неравномерное распределение прибывающих ВС по точкам входа на величину до 70 % в случае полностью неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа.

8. Показано, что использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков позволяет существенно сократить значения дополнительного полетного времени (времени ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием), которое можно отнести к непроизводительному налету (до 80 %) в воздушном пространстве узлового диспетчерского района, и, следовательно, организовать движение прибывающих ВС с меньшими задержками.

9. Установлено, что предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков приводит к сокращению дополнительного расхода топлива (топлива затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием) и снижению выбросов загрязняющих атмосферу веществ

(углекислого газа, угарного газа, оксида серы, углеводородов, сажи, окислов азота) на величину до 80%.

10. Экономически эффект от применения метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) составляет до 434 тысяч рублей в сутки за счет снижения затрат на дополнительный расход топлива (топлива затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием). Следует отметить, что данные расчеты основаны на статистике полетов на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково) в интенсивный день производства полетов. Таким образом, наиболее существенный экономический эффект достигается на аэродромах с высокой интенсивностью полетов, для которых характерно неравномерное распределением прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной проблемы по повышению эффективности аэронавигационного обеспечения полетов на этапах прибытия и захода на посадку в условиях различного распределения потоков прибывающих воздушных судов и приведены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ потоков прибывающих ВС на аэродромы, в которых используется система слияния потоков. Определена неравномерность потоков прибывающих ВС в течение суток.

2. Разработана модель системы слияния потоков ВС с использованием сети массового обслуживания и исследована традиционная система слияния потоков. Показано снижение пропускной способности традиционной системы слияния потоков на величину до 41,6% при неравномерном распределении прибывающих ВС.

3. Разработана модель усовершенствованной системы слияния потоков и показана возможность увеличения пропускной способности на величину до 70% при абсолютно неравномерном распределении прибывающих ВС.

4. Для организации воздушного движения прибывающих ВС по направлениям прибытия, с учетом предложенной модели усовершенствованной системы слияния потоков, разработан метод, исключающий простои, связанные с формированием интервалов на посадку. Новизна предлагаемого метода заключается в использовании нескольких эшелонов для полета ВС на траектории задержки. Доступные для полета эшелоны динамически перераспределяют между точками входа на траектории задержки в соответствии с заданным условием. Реализация предложенного метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков достигается соответствующим порядком технологических действий диспетчера УВД.

5. Моделированием с использованием комплексного диспетчерского тренажера подтверждена неэффективность использования метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков и отмечено преимущество метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков. Результатами моделирования показано, что предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков позволяет привести к сокращению дополнительного расхода топлива (топлива, затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием) на величину до 70%.

6. Использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков также приводит уменьшению количества сеансов радиосвязи на величину от 18 до 30%, снижению загруженности диспетчеров УВД на величину от 26 до 33%.

7. Проведен расчет показателей эффективности аэронавигационного обслуживания при применении усовершенствованной системы слияния потоков. Показано, что использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков позволяет существенно сократить значения дополнительного полетного времени (времени ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием) в воздушном пространстве узлового диспетчерского района, и, следовательно, организовать движение прибывающих ВС с меньшими задержками. Ожидаемый экономический эффект от применения метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) составляет сотни тысяч рублей в сутки за счет снижения затрат на дополнительный расход топлива (топлива затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием). Следует отметить, что наиболее существенный эффект достигается

на аэродромах с высокой интенсивностью полетов и неравномерным распределением прибывающих ВС в зависимости от направления прибытия.

8. Предложенный метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков апробирован и доведен до практической реализации в аэроузловом диспетчерском центре ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Внедрение предложенного метода позволило повысить пропускную способность системы слияния потоков, применяемой на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково) на 70 % (в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки).

Применение полученных в работе результатов позволяют:

1. Повысить пропускную способность системы слияния потоков на величину до 70% (в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки) с 28 до 48 ВС/час.

2. Снизить время ожидания ВС, в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 179 до 32 минут в сутки. Время ожидания в среднем сокращается на 0,54 минуты для одного ВС.

3. Сократить расход топлива, затрачиваемого на ожидание (непроизводительный налет в связи с ожиданием) в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 7800 до 1400 килограммов в сутки. Годовая экономия топлива, по грубой оценке составляет 1168 тонн в год.

4. Уменьшить часть количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, возникающих при выполнении ожидания (непроизводительного налета в связи с ожиданием) в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 24 до 4,3 тонн в

сутки (выбросы  $\text{CO}_2$ ). Годовое сокращение выбросов  $\text{CO}_2$ , по грубой оценке составляет 3 595 тонн в год.

Направление дальнейших исследований:

1. Поиск оптимальных методов формирования заданных интервалов и определения очередности заходов ВС на посадку при использовании усовершенствованной системы слияния потоков.
2. Определение допустимого количества эшелонов, используемых на траекториях задержки в зависимости от пропускной способности ВПП.
3. Разработка алгоритма поддержки принятия решений по динамическому перераспределению эшелонов ВС на траекториях задержки.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВПП	–	взлетно-посадочная полоса
ВС	–	воздушное судно
УВД	–	управление воздушным движением
ИКАО	–	Международная организация гражданской авиации
ЕС ОрВД	–	Единая система организации воздушного движения
STAR	–	стандартный маршрут прибытия
ДПП	–	диспетчерский пункт подхода
ДПК	–	диспетчерский пункт круга
УТЦ	–	Всемирное координированное время
ССП	–	система слияния потоков
СМО	–	система массового обслуживания
СеМО	–	сеть массового обслуживания
ТСПП	–	традиционная система слияния потоков
УСПП	–	усовершенствованная система слияния потоков
$L_{\text{входа}}$	–	допустимый горизонтальный интервал на точку входа
$L_{\text{пос}}$	–	допустимый интервал на посадку, при котором гарантируется освобождение ВПП воздушным судном, следующим впереди
$m$	–	количество точек входа
$L_{\text{посфакт}}$	–	фактический интервал на посадку, который может быть создан диспетчером круга
$L_{\text{изб}}$	–	расстояние, пролетаемое ВС, которое перенаправлено на другую точку входа, с целью выравнивания потоков прибывающих ВС
$\tau_{i,\text{п}}$	–	время поступления $i$ -го ВС в зону ожидания
$\Omega_{i,\text{п}}$	–	время поступления $i$ -го ВС на участок между точкой выхода ВС из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки

- $x_{i,п}$  — выраженный временем интервал за  $i$ -м ВС, когда следующее ВС может покинуть зону ожидания
- $\tau_{i,к}$  — время поступления  $i$ -го ВС на траекторию задержки (пролета точки входа на траекторию задержки)
- $\Omega_{i,к}$  — время покидания  $i$ -м ВС траектории задержки, и начала следования на точку слияния
- $\Theta_i$  — время завершения формирования интервала за  $i$ -м ВС, покинувшим траекторию задержки
- $x_{i,к}$  — выраженный временем интервал за  $i$ -м ВС, когда следующее ВС может покинуть траекторию задержки
- $L_{доп}$  — выраженный расстоянием горизонтальный интервал, применяемый при диспетчерском обслуживании подхода
- $L_{адо}$  — выраженный расстоянием горизонтальный интервал, применяемый при аэродромном диспетчерском обслуживании
- $\chi_k$  — выраженный временем продольный интервал на посадку
- $L_{тз}$  — выраженный расстоянием продольный интервал, применяемый для исключения сокращения горизонтального интервала, в момент выполнения разворотов при диспетчерском обслуживании подхода
- $\chi_п$  — выраженный временем продольный интервал, применяемый для исключения сокращения горизонтального интервала, в момент выполнения разворотов при диспетчерском обслуживании подхода
- $W_{тз}$  — скорость полета ВС при выполнении ожидания и полета по траектории задержки
- $W_{глисс}$  — скорость полета ВС на конечном участке полета по глиссаде
- $\lambda_1$  — интенсивность потока прибывающих ВС с направления ДПП 1
- $\lambda_2$  — интенсивность потока прибывающих ВС с направления

## ДПП 2

$n$	—	общее количество доступных эшелонов на траекториях задержки
$k$	—	количество доступных эшелонов на 1-й траектории задержки (поток ВС от ДПП 1)
$l$	—	количество доступных эшелонов на 2-й траектории задержки, (поток ВС от ДПП 2)
$\mu_{\text{вп\_пос}}$	—	пропускная способность воздушного пространства посадочной прямой
$\mu_{\text{ссп}}$	—	пропускная способность ССП
$\mu_{\text{дпп1}}$	—	пропускная способность СМО ДПП 1
$\mu_{\text{дпп2}}$	—	пропускная способность СМО ДПП 2
$A\mu_{\text{сеМО}}$	—	абсолютная пропускная способность сети массового обслуживания
$L_{\Sigma\_потерь\_Э_j}$	—	суммарные потери при формировании интервала на посадку в $j$ -ом эксперименте
$Э_j$	—	$j$ -й эксперимент на диспетчерском тренажере
$K_{\text{р/с}_j}$	—	количество сеансов радиосвязи в $j$ -ом эксперименте
$T_{\text{э}}$	—	продолжительность эксперимента на диспетчерском тренажере
$T_{\text{р/с}_j}$	—	время, затраченное на сеансы радиосвязи в $j$ -ом эксперименте
$K_{\text{э}_j}$	—	коэффициент загрузки в $j$ -ом эксперименте
$L_{\text{посфакт\_ср\_Э}_j}$	—	среднее значение фактически сформированного интервала на посадку в $j$ -ом эксперименте
$\mu_{\text{вп\_пос\_Э}_j}$	—	пропускная способность воздушного пространства посадочной прямой в $j$ -ом эксперименте
$Q_{\text{доп\_Э}_j}$	—	дополнительный расход топлива в $j$ -ом эксперименте
$Q_{\text{т204}}$	—	часовой расход топлива ВС типа Ту-204
$\mu_{\text{дпп\_т}}$	—	суммарная пропускная способность диспетчерских пунктов

подхода в традиционной ССП

$\mu_{\text{тссп}}$	—	пропускная способность традиционной ССП
$\mu_{\text{дпп}_y}$	—	суммарная пропускная способность диспетчерских пунктов подхода в усовершенствованной ССП
$\mu_{\text{уссп}}$	—	пропускная способность усовершенствованной ССП
$T_{\text{сут}_\text{тссп}}$	—	суммарное дополнительное время за сутки полетов при использовании традиционной ССП
$T_{\text{сут}_\text{уссп}}$	—	суммарное дополнительное время за сутки полетов при использовании усовершенствованной ССП
$Q_{\text{сут}_\text{тссп}}$	—	расход топлива при полетах в рамках дополнительного полетного времени при использовании традиционной ССП
$Q_{\text{сут}_\text{уссп}}$	—	расход топлива при полетах в рамках дополнительного полетного времени при использовании усовершенствованной ССП
$Q_{\text{ср}}$	—	среднечасовой расход топлива за час полета
$EI_z$	—	индекс эмиссии <i>z-go</i> загрязняющего вещества
$\mathcal{E}_{\text{сут}_\text{тссп}}$	—	затраты на дополнительный расход топлива, при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС, с использованием традиционной ССП
$\mathcal{E}_{\text{сут}_\text{уссп}}$	—	затраты на дополнительный расход топлива, при применении метода организации воздушного движения прибывающих ВС, с использованием усовершенствованной ССП
$S_{\text{ТС-1}}$	—	стоимость авиационного топлива

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 ULLI-13.6, ULLI-147, ULLI-148, ULLI-149, ULLI-150. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
2. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 USSS-147. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
3. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 URML-147, URML-148, URML-149, URML-150. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
4. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 UMKK-149. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
5. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 UHHH-149. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
6. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 URMN-147, URMN-148. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
7. AIP Российской Федерации, часть III, книга 1, AD 2.1 UNNT-151, UNNT-152. [Электронный ресурс] URL: [http://www.caiga.ru/ANI\\_Official/Aip/html/rus.htm](http://www.caiga.ru/ANI_Official/Aip/html/rus.htm) (Дата обращения 10.12.2023).
8. Ассоров Н.А. Анализ организации воздушного движения в некоторых крупных аэропортах мира // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 5-12.
9. Point Merge Implementation. A quick guide. EUROCONTROL, Edition 1.5., 2024.
10. Implementation and trail operations of point merge arrivals at Beijing capital international airport. Eleven meeting of ATM Sub-Group. ICAO. October 2023.

11. Point Merge System and Arrival Metering Synergy Effect Estimation of Inbound Flight Efficiency at Tokyo International (Haneda) Airport. International Consil of Aeronautical Sciences. Shanghai, 2021.
12. Point Merge – a new approach to air traffic control at Dublin // EOLAS Magazine, February 2012.
13. AIP IRELAND EIDW AD, 06 OCT 2022 24-22-1 [Электронный ресурс] URL:[https://www.airnav.ie/getattachment/eb6d2a6be1114dd084f51231ad89fe78/EI\\_AD\\_2\\_EIDW\\_24-22-1\\_en.pdf?lang=en-IE](https://www.airnav.ie/getattachment/eb6d2a6be1114dd084f51231ad89fe78/EI_AD_2_EIDW_24-22-1_en.pdf?lang=en-IE) (Дата обращения: 10.12.2023).
14. Глухов Ю.Е., Коновалов А.Е. Альтернативный вариант реорганизации структуры воздушного пространства в московском узловом диспетчерском районе // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 60-65.
15. Дивак Н.И. К вопросу о разработке новой структуры воздушного пространства московской воздушной зоны // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 67-70.
16. Дивак Н.И., Нечаев Е.Е. Анализ структуры воздушного пространства МВЗ // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 13-17.
17. Shaw C., Ivanescu D. Point Merge. Fast-time simulation of Point Merge indicates significant improvements. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge. 2008.
18. Ivanescu D., Shaw C., Tamvaclis C., Kuttunen T. Models of air traffic merging techniques: Evaluating performance of point merge. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge, ISA SOFTWARE, Paris, France. 2009.
19. Ludovic Boursier, Bruno Favennec, Eric Hoffman, Aymeric Tirzmiel, Francois Vergne, Karim Zeghal. Merging arrival flows without heading instructions. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge. 2010.
20. Кумков С.И., Пятко С.Г., Спиридонов А.А. Исследование стандартной и веерной схем задержки ВС в зоне подхода // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20. С. 63-73.

21. Pilot implementation of point merge at area control for arrival flows to Guangzhou Baiyun airport. Eleven meeting of ATM Sub-Group. ICAO. October 2023
22. Real Time Simulation Based on Dublin TMA (Stage 1). EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge 2008.
23. Real Time Simulation Based on Dublin TMA Phase 2. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge 2010.
24. Real Time Simulation Oslo ASAP. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge 2010.
25. Real Time simulation in support of Point Merge live trails in Paris ACC. EUROCONTROL 2012
26. Луговой В.Г. Применение процедуры Point Merge в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих воздушных судов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 4 (17). С.25-37.
27. Луговой В. Г., Проблемы проектирования и применения стандартных траекторий прибытия (STAR), которые имеют участки для задержки ВС. // Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов «Состояние и перспективы развития аэронавигационной системы России». – 2019, . – С. 66-72.
28. Плясовских А.П., Луговой В.Г., Модель системы слияния потоков прибывающих воздушных судов с помощью сети массового обслуживания // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 4 (40). С.69-85.
29. Асатуров М.Л., Загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах // ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский университет гражданской авиации». Санкт-Петербург, 2010.
30. Eurocontrol airspace planning manual. Section 5. Terminal airspace design guidelines // EUROCONTROL 2005.
31. Правила аэронавигационного обслуживания. Дос 4444, Организация воздушного движения // ICAO, Издание 16, 2016.

32. Procedures for air navigation services. Doc 8168, Aircraft operations, Vol 1 – Flight procedures. // ICAO, 6<sup>th</sup> edition, 2018.
33. Doc 9931, Continuous descent operations (CDO) manual // ICAO, 1<sup>st</sup> edition, 2010.
34. Doc 9432, Руководство по радиотелефонной связи // ICAO, 4<sup>th</sup> edition, 2007.
35. Приказ Минтранса России от 25.11.2011 № 293 (ред. от 12.05.2014) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2011 № 22874)».
36. Приказ Минтранса России от 31.07.2009 № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.08.2009 N 14645).
37. Приказ Минтранса России от 26.09.2012 № 362 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Порядок осуществления радиосвязи в воздушном пространстве Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 09.04.2013 N 28047).
38. Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent, 2010, EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge.
39. Operational Service and Environment Definition (OSED) for Point Merge in Complex TMA, EUROCONTROL 2012.
40. Point Merge implementation. A quick guide. Simplifying and enhancing arrival operations with closed loop sequencing: Edition: 1.4., EUROCONTROL 2021.
41. Малыгин В.Б., Губенко С.В., Турков А.Н. Новый метод управления воздушным движением в зонах ожидания // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014, № 209. – с. 101-103.

42. Кумков С.И., Пятко С.Г., Овчинников М.М., Исследование многоверной схемы бесконфликтного слияния потоков прибывающих воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018, № 22. – с. 109-117.

43. Ассоров Н.А., К вопросу построения прилетного потока ВС // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017, № 4. – С. 52-58.

44. Глухов Ю.Е., Повышение эффективности УВД при заходе ВС на посадку на основе использования технологий АЗН-В // Научный вестник МГТУ ГА. – 2009, № 139. – С. 104-108.

45. Александров Э.М. Ключников Ю.И., Векторение воздушных судов: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2011.

46. В.И. Алешин, Дарымов Ю.П., Крыжановский Г.А. Организация управления воздушным движением. Москва, 1988.

47. Купин В.В., Луговой В.Г., Применение тактических точек пути стандартного маршрута вылета зональной навигации для организации потока вылетающих воздушных судов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2018. № 1 (18). С.83-101.

48. Луговой В. Г., Сорокин А.В., Шилов О.В., Проблемы, связанные с определением необходимого количества топлива при планировании полетов по стандартным траекториям прибытия (STAR), которые имеют участки для задержки ВС оптимальной загруженности траекторий задержки, при использовании системы Point Merge // Научный вестник МГТУ ГА. – 2019, № 2. – С. 28-33.

49. Луговой В.Г., Разработка критериев поддержания оптимальной загруженности траекторий задержки, при использовании Point Merge // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 3 (28). С.45-58.

50. Луговой В. Г., Особенности определения очередности заходов на посадку при использовании систем Point Merge // Сборник материалов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов

«Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов». Москва 2020, С. 111-114.

51. Луговой В. Г., Особенности формирования интервалов на посадку при использовании систем Point Merge // Сборник материалов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов». Москва 2021, С. 67-73.

52. Луговой В.Г., Оценка эффективности внедрения маршрутов расчета топлива в системах Point Merge // Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации.

53. Луговой В. Г., Результаты внедрения маршрутов расчета топлива в системе Point Merge аэродрома Санкт-Петербург (Пулково), ожидаемый эффект для других аэродромов // Сборник материалов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов». Москва 2021, С. 67-73.

54. Global Air Navigation Plan, ICAO. URL: <https://www4.icao.int/ganpportal/> (дата обращения 26.10.2024).

55. Aviation System Block Upgrades, Монреаль, Канада: ИКАО, 2016.

56. Алешин А.В., Алгоритмы формирования очередности захода на посадку при маневрировании в зоне ожидания // Вестник «Санкт-Петербургского университета гражданской авиации». Санкт-Петербург, 2013.

57. Bruno Favennec, Pascal Marx, Aymeric Tirzmiel, Karim Zeghal. How the geometry of arrival routes can influence sequencing. AIAA Aviation technology, integration and operation conference. Atlanta, Georgia, U.S.A. 2018.

58. Shannon J. Zelinski, Jaewoo Jung, Arrival scheduling with shortcut path options and mixed aircraft performance. 10<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic research and development seminar, Lisbon, Portugal, 2015.
59. Raphaël Christien, Eric Hoffman, Aymeric Trzmiel, Karim Zeghal. An extended analysis of sequencing arrivals at three major European airports. AIAA Aviation technology, integration and operation conference. Atlanta, Georgia, U.S.A. 2018.
60. Montlaur A., Delgado L. Delay assignment optimization strategies at pre-tactical and tactical levels. 5<sup>th</sup> SESAR Innovation Days, Bologna, Italy, 2015.
61. Щепилов Ю.Н., Построение аэродромных схем: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2013.
62. Князевский Д.А., Организация и обслуживание воздушного движения: учебное пособие. Ульяновск, 2011.
63. Procedures for air navigation services. Doc 8168, Aircraft operations, Vol 2 – Construction of visual and instrument flight procedures. // ICAO, 7<sup>th</sup> edition, 2020.
64. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Doc 9613. // ICAO, 4<sup>th</sup> edition, 2013.
65. Хиврич И.Г., Миронов Н.Ф., Белкин А.М. Воздушная навигация. Москва: Транспорт, 1984. - 328 с.
66. Беляевский Л.А., Крыжановский Г.А., Харченко В.П., Ткаченко В.П. Радиоконтроль траекторий движения летательных аппаратов. Москва, 1996.
67. Bruno Favennec, Eric Hoffman, Aymeric Tirzmiel, Francois Vergne, Karim Zeghal. The point merge arrival flow integration technique: Toward more complex environments and advanced continuous descent. EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, Brétigny-sur-Orge. 2009.
68. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации, утверждены постановлением правительства Российской Федерации, от 11 марта 2010 №138.
69. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания // Машиностроение. 1979. Москва.

70. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания, учебное пособие // Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2022. Екатеринбург.
71. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Однолинейные системы массового обслуживания, учебное пособие // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций. 2010. Санкт-Петербург.
72. Романенко В.А, Системы и сети массового обслуживания, учебное пособие // Самарский национальный исследовательский университет имени Академика С.П. Королева. 2021. Самара
73. Романенко В.А., Оптимизация параметров системы обслуживания перевозок узлового аэропорта на базе численного интегрирования уравнений Колмогорова // Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королева. С. 42 – 49.
74. Ивенин И.Б., Куриленок А.С, Оптимальное управление трафиком воздушных судов, следующих в аэродромной зоне на посадку // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018, № 2. – С. 22-31.
75. Малыгин В.Б. Определение характеристик конечных участков стандартных маршрутов прибытия с помощью аппарата системы массового обслуживания // Научный вестник МГТУ ГА. – 2022, № 3. – С. 26-35.
76. Береславский Э.Н., Крыжановский Г.А. Применение Марковских процессов при моделировании некоторых систем массового обслуживания: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2009.
77. Приказ Минтранса Российской Федерации от 24 февраля 2011 г. № 63 «Об утверждении методики расчета технической возможности аэропортов и Порядка применения Методики расчета технической возможности аэропортов».
78. Стариков Ю.Н., Иванченко В.П. Практическая аэродинамика самолета Ту-204: учебное пособие. Ульяновск, 1996.
79. Приказ Федерального агентства воздушного транспорта от 07.11.12 № 757 «Об утверждении Методики определения нормативов пропускной

способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения».

80. Высоцкий В.З. Коэффициент загрузки диспетчера УВД как показатель безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2006, № 99. – С. 150-151

81. Логвин А.И., Высоцкий В.З. Влияние качества речевого радиообмена в системах УВД на безопасность полетов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2006, № 99. – С. 152-154

82. Униченко Е.Г. Влияние качества функционирования каналов авиационной командной связи на безопасность и эффективность УВД // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013, № 193. – С. 84-86

83. Власова А.В. Коэффициент загрузки диспетчера УВД как показатель уровня управления безопасностью полетов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018, № 22. – с. 102-108.

84. Дарымов Ю.П., Жидовинов А.Ф., Крыжановский Г.А. Автоматизация речевого взаимодействия. Москва, 1985.

85. Коваленко Г.В., Крыжановский Г.А., Сухих Н.Н., Хорошавцев Е.Ю. Совершенствование профессиональной подготовки летного и диспетчерского составов. Москва, 1996.

86. Печенежский В.К., Сазонова А.М. Оценка влияния загруженности сектора управления воздушным движением на экономическую эффективность полетов воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014, № 209. – С. 38-44.

87. Doc 9883, Руководство по глобальным характеристикам аэронавигационной системы // ИКАО, Montreal, 2009.

88. Барановский А.М., Пятко С.Г., Федоров Ю.М. Структура показателей качества функционирования аэронавигационной системы России // Научный вестник «НИИ Аэронавигации». – 2013, № 12. – с. 75 – 96.

89. Барановский А.М. Сопоставительная оценка показателей качества функционирования аэронавигационных систем Евросоюза и России на 2020 год // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014, № 209, - с. 45 – 49.

90. Ghalem A., Okar C., Chroqui R., ATM Key performance indicators // IMII, Faculty of science and techniques, Morocco, 2017.
91. Review of current KPIs and proposal for new ones // SESAR Joint Undertaking, 2017.
92. ATM Airport Performance (ATMAP) Framework // Performance review unit, EUROCONTROL, 2009.
93. Lawrence Kyei Asante, Francisco Javier Saez Nieto, Complexity in the Optimisation of ATM Performance Metrics // Air Navigation Research Group UPM, London, 2012.
94. Capacity assessment and planning guidance document. // EUROCONTROL 2013.
95. Chesneau Sylvie, Fuller Ian, Hustache Jean-Claude, ATM Flight Efficiency and its impact on the environment. EUROCONTROL, 2002.
96. Chesneau Sylvie, Fuller Ian/ Environmental key performance indicators. EUROCONTROL, 2002.
97. Русол В.А., В.Ф. Киселев, Крылов Г.О. Справочник пилота и штурмана гражданской авиации. Москва, 1988.
98. Информация о деятельности воздушного транспорта (2000 – 2020 гг.) и авиакомпаний России (2001 – 2010 гг.) // Транспортная клиринговая палата. Москва, 2011, – С. 85-86.
99. Marcus Burzlaff, Aircraft fuel consumption - estimation and visualization. Faculty of Engineering and Computer Science, Department of Automotive and Aeronautical Engineereng, HAW Hamburg, Hamburg, 2017.
100. Alan MacDonald, A General View on Fuel Efficiency in Commercial Aviation, Department of Automotive and Aeronautical Engineereng, Hamburg University of Applied Sciences, Hamburg, 2017.
101. Аралова Е.А., Алявдин А.А. Воздействие воздушного транспорта на окружающую среду. Материалы V научно-практической конференции творческой молодежи, Секция «Техносферная безопасность» Актуальные проблемы Авиации

и Космонавтики. Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, 2019. С. 527-529.

102. Мельников Б.Н., Большунов Ю.А. Актуальные направления исследований в области повышения топливной эффективности парка эксплуатируемых самолетов и снижения выбросов парниковых газов в гражданской авиации с учетом требований киотского протокола. // Научный вестник МГТУ ГА. – 2008, № 135. – С. 104-112

103. Иванова А.Р. Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия // Труды Гидрометцентра России. 2017. №365. С. 5-14.

104. Цены на авиаГСМ в 2022 году. // Официальный сайт федерального агентства воздушного транспорта [www.favt.gov.ru](http://www.favt.gov.ru). URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-ceny-na-aviagsm/?id=8788>. (Дата обращения: 10.04.2023).

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника аэроузлового  
диспетчерского центра ЕС ОрВД

Дыбко Ю.А.

2024 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
Лугового Вениамина Геннадьевича

Комиссия в составе:

председателя:	Диспетчера-инструктора АуздЦ ЕС ОрВД	С.Ю. Анисимова
членов комиссии:	Диспетчера-инструктора АуздЦ ЕС ОрВД	Е.О. Юшковой
	Руководителя полетов АуздЦ ЕС ОрВД	А.С. Спивака

Составила настоящий акт, о том, что результаты диссертационной работы Лугового Вениамина Геннадьевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ходе разработки, внедрения и эксплуатации структуры воздушного пространства и схем маневрирования, используемым в районе аэродрома Санкт-Петербург (Пулково).

При разработке структуры воздушного пространства и схем маневрирования использован разработанный способ организации воздушного движения прибывающих воздушных судов с использованием усовершенствованной системы слияния потоков (Далее Способ), траектории задержки расположены на дистанциях от точки слияния, которая позволяет использовать несколько эшелонов для снижения ВС с траектории задержки. В технологии работы диспетчеров аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург) внесены положения о порядке использования разных эшелонов на траекториях задержки системы слияния потоков, используемой на схемах маневрирования аэродрома Санкт-Петербург (Пулково).

Председатель комиссии

Члены комиссии

С.Ю. Анисимов

Е.О. Юшкова

А.С. Спивак



Главный конструктор АО «Азимут»  
к.т.н. Миролобов А.М.

16 февраля 2024 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Лугового Вениамина Геннадьевича

Комиссия в составе:

председателя:	Руководителя направления КДТ	А.З. Бутусова;
членов комиссии:	Инженера по направлению КДТ	Е.В. Вагина
	Инженера по направлению РЛК	О.В. Бушуева

Составила настоящий акт, о том, что результаты диссертационной работы Лугового Вениамина Геннадьевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ходе разработки, поставки и настройки оборудования комплексного диспетчерского тренажера «Галактика» используемого для проведения тренировок персонала ОВД Аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург).

При разработке, а также дальнейшей поставке и настройке оборудования КДТ «Галактика» использован разработанный способ организации воздушного движения прибывающих воздушных судов с использованием усовершенствованной системы слияния потоков (Далее Способ). Для рабочего места пилота-оператора КДТ «Галактика» разработан функционал, учитывающий необходимые операции с ВС, при использовании Способа, включая использование зон ожидания, использование процедуры «прямо на», использование для полета разных эшелонов на траекториях задержки системы слияния потоков. Для рабочего места диспетчера УВД внедрены соответствующие средства вывода информации, позволяющие анализировать ожидаемый поток прибывающих ВС по направлениям прибытия.

Председатель комиссии

Члены комиссии

*А.З. Бутусов*

А.З. Бутусов

*О.В. Бушуев*

О.В. Бушуев

*Е.В. Вагин*

Е.В. Вагин