

УДК 621.391

## Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи

### Часть 2. Исследование пропускной способности объединенной сети и разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона

Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И.

**Постановка задачи:** как показывает опыт ведения боевых действий, Воздушно-космические силы России применяются не только для решения задач специальных военных операций на прилегающих территориях к Российской Федерации, но и для отстаивания интересов России за ее пределами, где не всегда возможно организовать оперативное глобальное управление. Обеспечение глобальности управления достигается за счет сопряжения сети воздушной радиосвязи (СВРС) управления авиации и спутниковой сети связи (ССС), обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли. Вместе с тем, практическая реализация сопряжения не может быть достигнута простой установкой средств радиосвязи СВРС и СССР в состав авиационных комплексов связи, это связано с решением ряда дополнительных технологических задач, таких как: согласование скоростей обмена данными, разработка протоколов совместного функционирования СВРС и СССР, разработка протоколов маршрутизации и ретрансляции сообщений, а также выполнение требований по пропускной способности сетей воздушной и космической радиосвязи. В первой части работы были получены модели и методика обеспечения высокой пропускной способности объединённой воздушно-космической сети связи (ОВКСС). **Целью данной работы** является проведение исследований моделей и методики в интересах обоснования наиболее рациональных режимов организации связи, а также обоснования алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона, на практике реализующего эти режимы. **К элементам новизны**, представленных исследований, относится рассмотрение ОВКСС как многоуровневой системы связи, ядром которой является СССР, а нижний уровень образован СВРС, а также учет возможностей по реализации Mesh-технологии в СВРС для модели с децентрализованным распределением информационных ресурсов. Новизной методики, отличающей ее от аналогичных работ, является совместный учет специфики как СВРС, так и СССР, а также использование метода Ньютона для получения решения по балансировки нагрузки в между воздушным и космическим сегментами. **Результат:** проведенное исследование показывает, что использование Mesh-технологий для объединения СВРС в воздушном сегменте, позволяет ретранслировать большую часть трафика ОВКСС через смежные СВРС и тем самым повысить пропускную способность ОВКСС по показателю одновременного числа обслуживаемых абонентов в 2...4 раза, для современного авиационного оборудования связи и до 9 раз – для перспективного. **Практическая значимость:** предложен алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона основанный на разработанной методике распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС, ко-

#### Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 2. Исследование пропускной способности объединенной сети и разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 260-285. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-260-285

#### Reference for citation:

Ivanov M. S., Aganesov A. V., Makarenko S. I. Bandwidth increasing the of a united aerospace communications network. Part 2. Studying of bandwidth increasing in a joint aerospace communications network and developing an information flows distribution algorithm for an air network router. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 260-285 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-260-285

*торый обеспечивает сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелона объединённой автоматизированной цифровой сети связи (ОАЦСС) и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений. Алгоритм предлагается к реализации в составе математического обеспечения перспективных бортовых авиационных комплексов связи.*

*Ключевые слова: сеть воздушной радиосвязи, спутниковая сеть связи, организация связи, военная авиация, управление летательными аппаратами.*

## Введение

Сложная военно-политическая обстановка в мире, существенно увеличивает вероятность применения Воздушно-космических Сил (ВКС) в различных точках Земли, в которых Российская Федерация (РФ) имеет свои интересы. Одним из примеров такого применения ВКС является задействование оперативно-тактической и стратегической авиации в операции против террористических военизированных формирований по просьбе правительства Сирии. В связи с этим актуальной военно-прикладной задачей является обеспечение глобального поля управления авиацией, в том числе, и за пределами территории РФ. Обеспечение глобальности управления можно достичь только за счет сопряжения сети воздушной радиосвязи (СВРС) управления авиации в районе его боевого применения и спутниковой сети связи (ССС), обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли. Такое сопряжение предусмотрено перспективной концепцией построения военных систем связи и позволит создать единую объединенную воздушно-космическую сеть связи (ОВКСС) глобального управления авиацией в масштабах Земли. Вместе с тем, практическая реализация сопряжения не может быть достигнута простой установкой средств радиосвязи СВРС и СССР в состав авиационных комплексов связи, это связано с решением ряда дополнительных технологических задач.

К таким, задачам относится согласование скоростей обмена данными, разработка протоколов совместного функционирования СВРС и СССР, разработка протоколов маршрутизации и ретрансляции сообщений в ОВКСС и другие задачи. Кроме того, опыт применения авиации ВКС РФ в Сирии показал, что авиацию, помимо нанесения ударов по наземным целям, широко применяют для разведки наземных целей, целеуказания для применения высокоточного оружия (ВТО) морского базирования, а также контроля результатов ударов ВТО. Эти задачи требуют передачи по ОВКСС больших объемов разведывательной информации (изображения и видео в радиолокационном и оптическом диапазоне), а также интенсивного информационного обмена между абонентами ВКС, Военно-морского флота (ВМФ) и пунктами управления операцией как на территории Сирии, так и на территории РФ. При этом пропускной способности существующей сети связи, для передачи больших объемов информации, зачастую оказывается недостаточной, что приводит к высоким задержкам в передаче и потере оперативной ценности информации. Это делает актуальным проведение исследований в направлении повышения пропускной способности в ОВКСС.

В первой части данного исследования [1], были проанализированы и использованы известные модели: модель спутниковой сети связи (ССС) на основе

протокола S-Aloha и модель сети воздушной радиосвязи (СВРС) на основе протокола CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) – модель ненастойчивого множественного доступа.

Для реализации цели, поставленной в научном исследовании [1], – повышения пропускной способности объединённой воздушно-космической сети связи (ОВКСС), модель СВРС была модифицирована для учета транзитной информационной нагрузки других СВРС, а также ухода части информационных потоков в ССС, а модель ССС была модифицирована с целью учета сопряжения с СВРС в части распределения информационной нагрузки между ней и воздушным сегментом.

Вышеуказанные модели СВРС и ССС были использованы для разработки моделей ОВКСС с иерархическим и децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий, которые представлены в [1]. Для обоснования рационального значения доли трафика, ретранслируемого через ССС, с целью обеспечить заданный уровень своевременности передачи сообщений и исключения перегрузки спутникового сегмента ССС была разработана методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС, так же представленная в [1].

На основании результатов, полученных в первой части работы [1], в этой части представлены результаты исследования соответствующих моделей, с учетом тактико-технических характеристик (ТТХ) современных и перспективных средств связи, использование которых обосновывалось в рамках исследования. В частности, в данном разделе представлены следующие результаты:

- исследование модели СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA с целью обоснования ограниченности одной СВРС для ретрансляции информационных потоков и необходимости создания глобальной ОВКСС;
- исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе **иерархического** принципа ретрансляции информационных потоков с целью обоснования недостаточной пропускной способности ОВКСС на основе иерархического принципа и необходимости перехода к децентрализованному принципу ретрансляции;
- исследование качества обслуживания в ОВКСС на основе **децентрализованного** принципа ретрансляции информационных потоков с целью проверки гипотезы о повышении пропускной способности ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции, а также обоснованию необходимости балансировки нагрузки при таком принципе ретрансляции;
- проведен анализ прироста пропускной способности ОВКСС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков, с целью обоснования вывода о достижении цели научного исследования – повышения пропускной способности ОВКСС;

- проведено исследование качества обслуживания в ОВКСС при различных вариантах распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной сети связи на основе соответствующей методики;

Результаты, представленные в этой части работы, позволили обосновать рациональные значения параметров для распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту ОВКСС, которые в последствии были формализованы в виде алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона.

Статья является прямым продолжением первой части работы [1] и развивает цикл предыдущих работ авторов [5-20], посвященных тематике повышения пропускной способности и скорости передачи данных в сетях радиосвязи управления ЛА военной авиации.

### **1. Исследование процесса функционирования отдельной сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA**

В данном подразделе представлено моделирование функционирования СВРС на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA в соответствии с моделью, представленной в части первой данной научной работы [1].

Для моделирования используются следующие базовые исходные данные, с учетом соответствия их современным тактико-техническим характеристикам (ТТХ) авиационных средств связи:

- скорость канала множественного доступа (КМД):  $C=48000$  бит/с;
- объем пакета:  $D_{mes}=256$  бит;
- количество попыток повторной передачи  $K=16$ ;
- максимальное время передачи  $T_m=10$  с;
- расстояние между наиболее удаленными абонентами в сети  $d_{sot}=250$  км;
- коэффициент внешнего трафика  $k_{vn}=0,2$ ;
- коэффициент трафика квитанций об успешной доставке  $k_{kv}=0,1$ .

Скорость базового канала взята в 9600 бит/с, что соответствует «упаковке» речи кодеками стандартов:

- MELP (2400 бит/с, MOS – 3,5);
- G.723.1 /ACELP (5300 бит/с, MOS-3,7);
- TETRA/ACELP (4567бит/с, MOS-3,4);
- AMR/ACELP (4750бит/с, MOS-3.847).

Результаты моделирования представлены на рис. 1-6.

Проведенное моделирование показало, что транзитный трафик существенно влияет на СВРС. Так наличие транзитного трафика в сети приводит к росту эффективной пропускной способности СВРС на 10-20%, при этом время задержки сообщений в СВРС возрастает в 2-2,5 раза. Такой рост задержки передачи сообщений не позволяет передавать по СВРС трафик критичный к за-

держкам и как следствие актуализирует вопросы ретрансляции трафика через другие эшелоны связи.

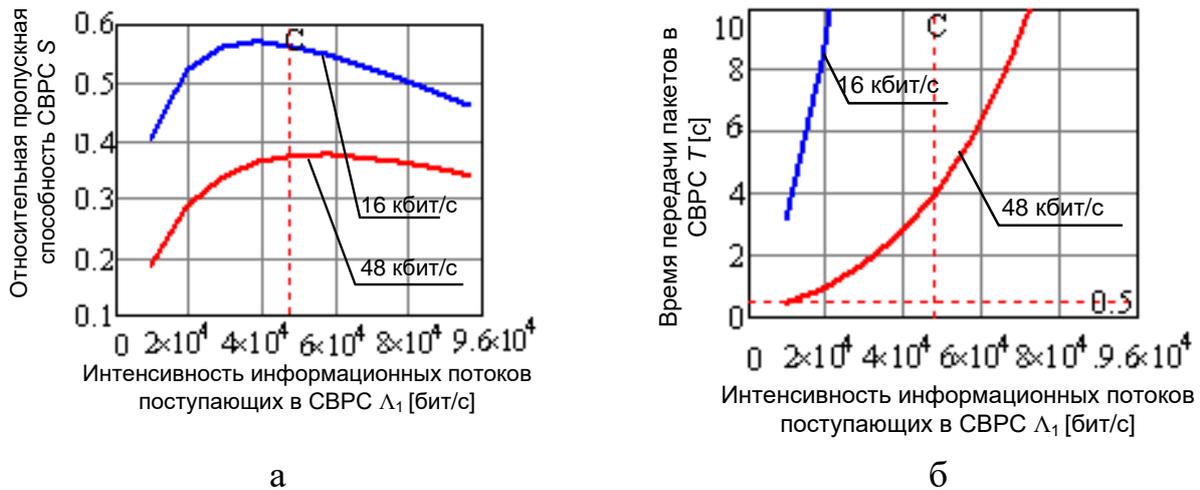


Рис. 1. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в СВРС в зависимости от загрузки для КМД с различной пропускной способностью

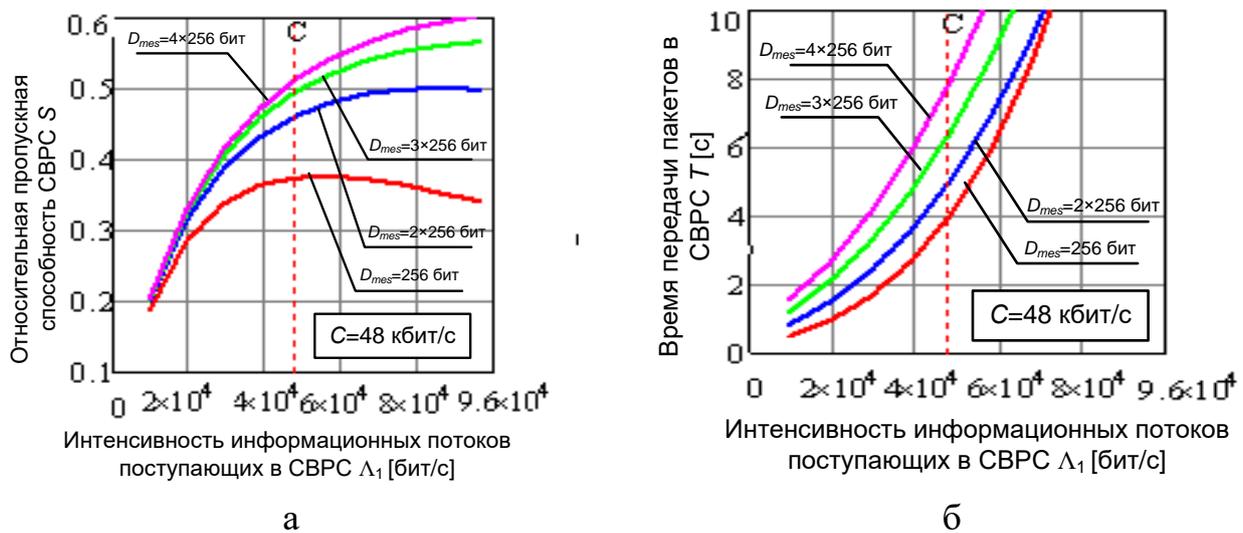
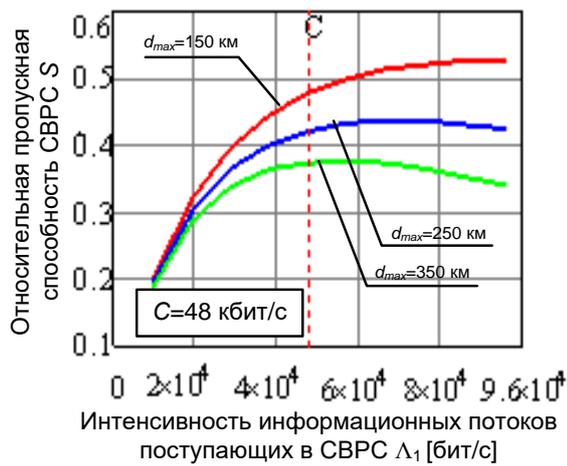
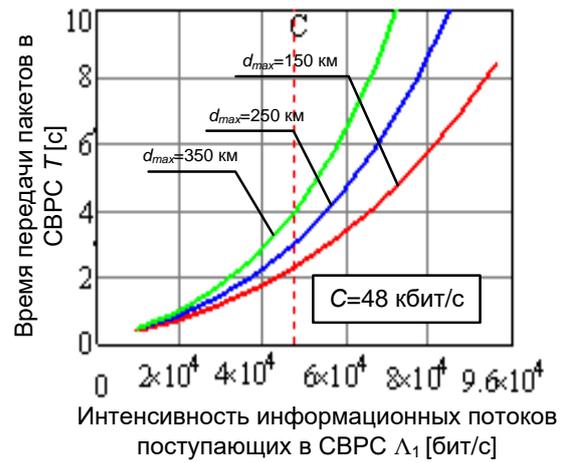


Рис. 2. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в СВРС в зависимости от загрузки для различного объема передаваемых пакетов

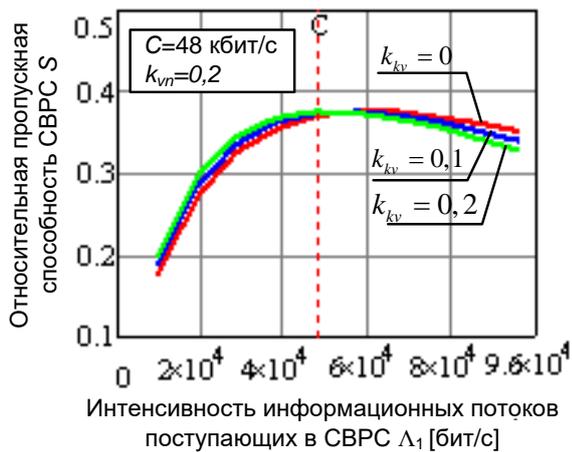


а

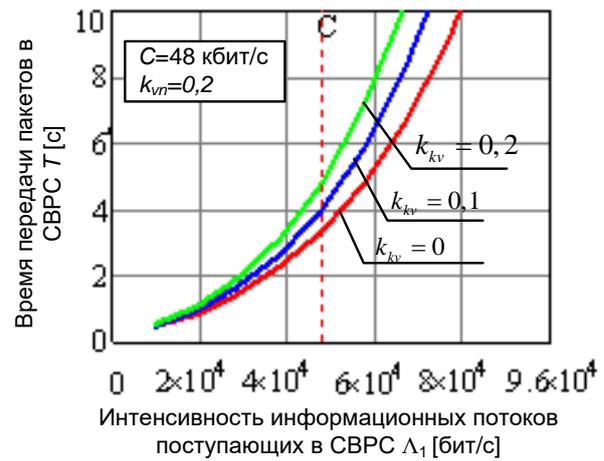


б

Рис. 3. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в зависимости от загрузки для СВРС различного радиуса



а



б

Рис. 4. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в СВРС в зависимости от загрузки для различных значений коэффициента трафика квитанций

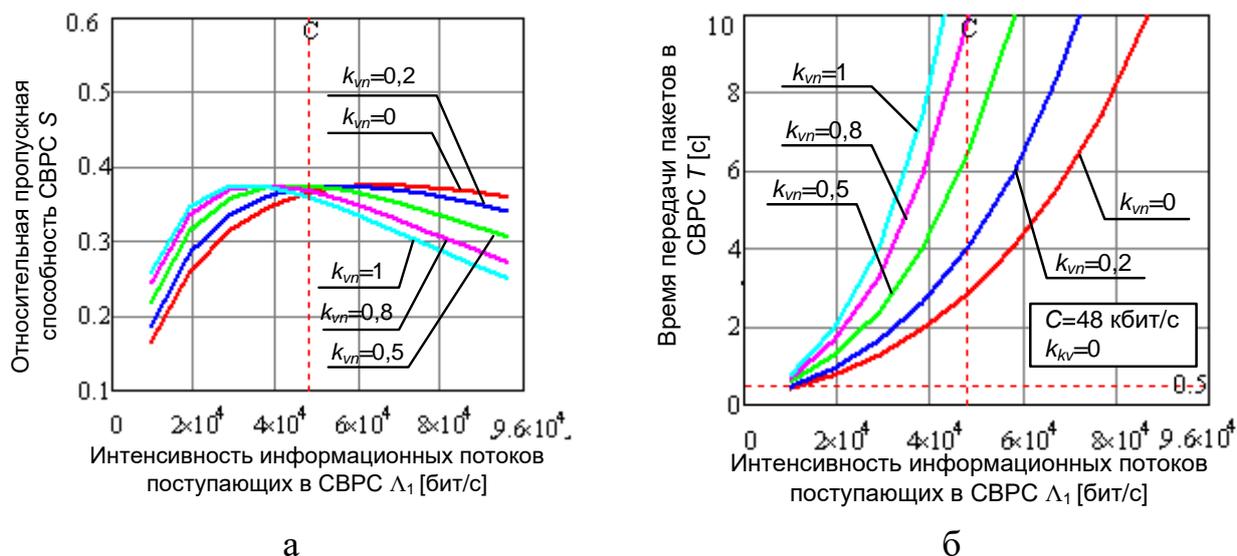


Рис. 5. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в СВРС в зависимости от загрузки для различных значений коэффициента внешнего трафика

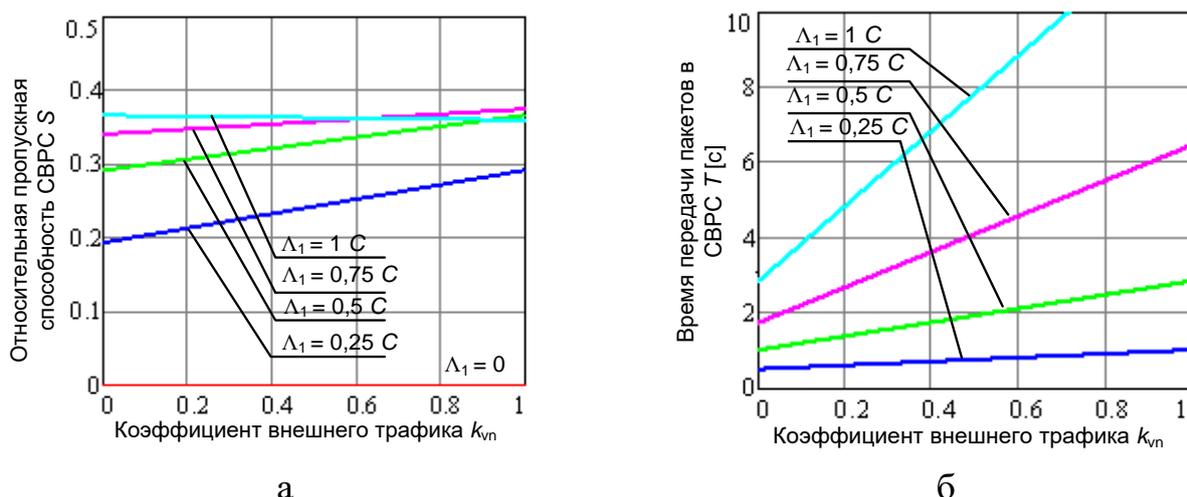


Рис. 6. Моделирование относительной пропускной способности  $S$  (а) и времени задержки передачи (б) в СВРС в зависимости от коэффициента внешнего трафика, при различных значениях нагрузки

## 2. Исследование качества обслуживания в объединенной воздушно-космической сети связи на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

### 2.1. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в информационном направлении связи (ИНС) для ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи [2-4]:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda=1,2$  кбит/с;
- количество абонентов СВРС  $M=1\dots 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;
- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C=48$  кбит/с, для CCC-13,3 кбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и CCC ( $D_{mes\ CCC}$ ) имеют равные значения-256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и CCC равны и имеют значения  $K=K_{CCC}=16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max}=250$  км.

Результаты моделирования представлены на рис. 7-10.

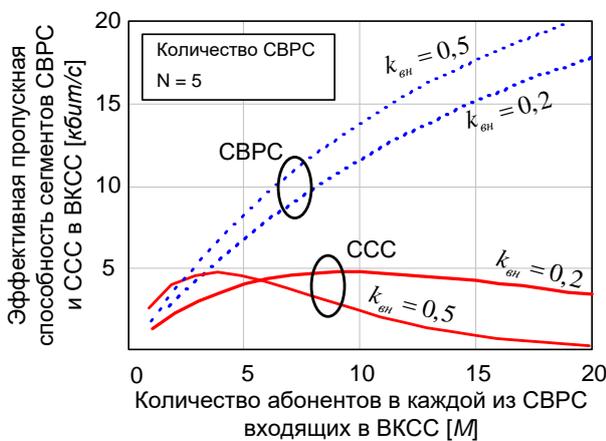


Рис. 7. Пропускная способность спутникового и воздушного сегментов ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена

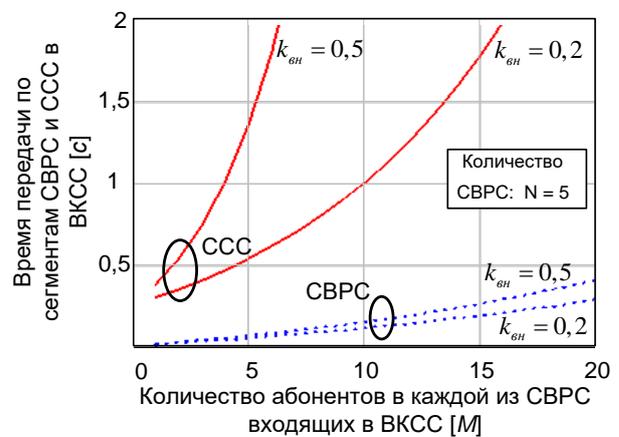
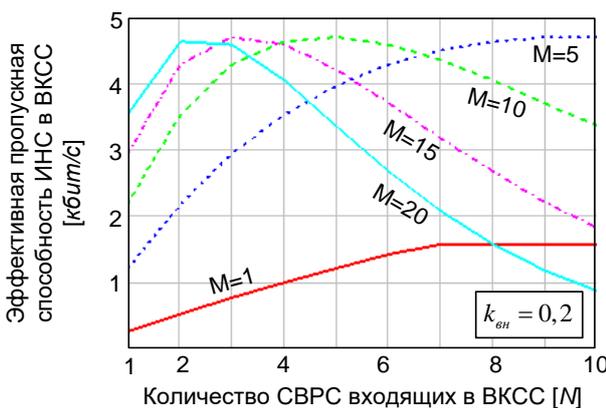
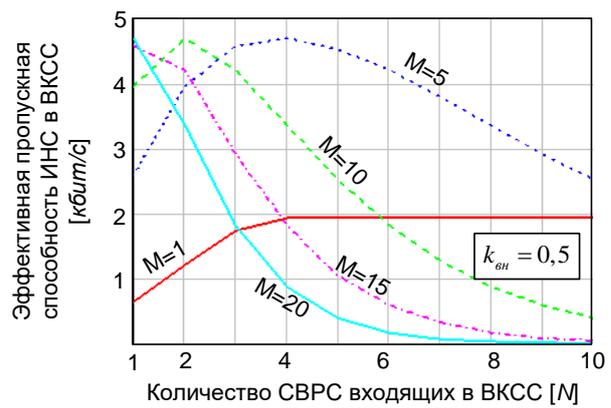


Рис. 8. Время передачи по спутниковому и воздушному сегментам ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена



а



б

Рис. 9. Пропускная способность информационного направления связи (ИИС) в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях  $k_{вн}$

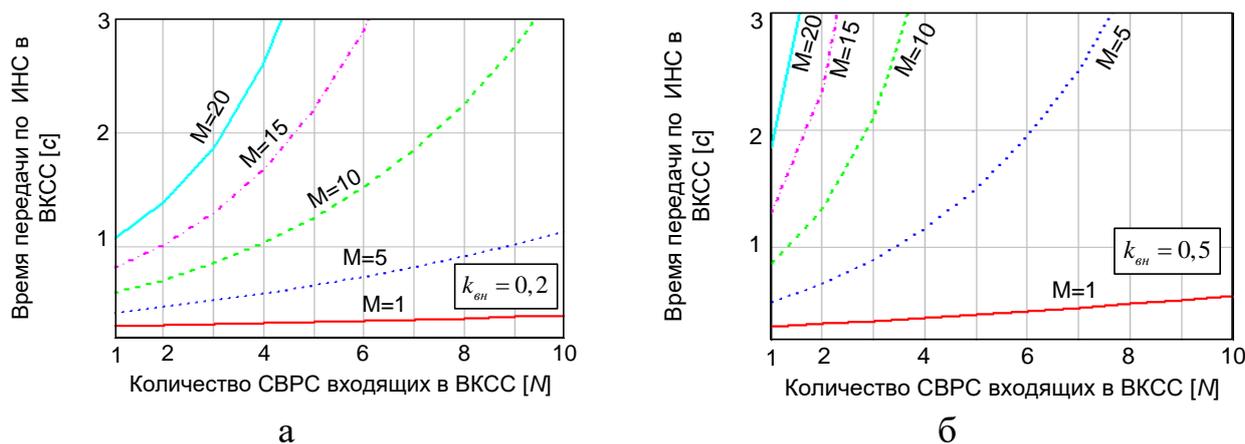


Рис. 10. Время задержки передачи по ИНС в ОVKCC с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях  $k_{вн}$

Как показали результаты моделирования, ввиду того, что пропускная способность спутникового сегмента ОVKCC существенно ниже пропускной способности СВРС (рис. 7), то общая пропускная способность ИНС в ОVKCC определяется пропускной способностью именно ССС сегмента (рис. 9). Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ИНС (рис. 8, рис. 10) – именно спутниковый сегмент ОVKCC определяет задержку передачи по ИНС.

Наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в VKCC является коэффициент внешнего трафика  $k_{вн}$  (рис. 9). По мере роста доли трафика, ретранслируемого в другие СВРС нагрузка на ССС увеличивается. С учетом того, что именно ССС является звеном в ИНС с наименьшей пропускной способностью, это приводит к резкому увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОVKCC (рис. 10), что не позволяют обслужить мультимедийный трафик (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки, при его передачи не должно превышать 0,5-0,6 с.

Фактически предельные возможности по структуре ОVKCC для передачи трафика реального времени ( $T_m < 0,6$  с) – 4 СВРС в каждой не более 5 абонентов по 1,2 кбит/с, при коэффициенте внешнего трафика  $k_{вн} \leq 0,2$ .

## 2.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

Рассмотрим возможности ОVKCC по обслуживанию мультимедийного трафика (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени) с учетом перспектив развития авиационных систем связи и планируемого увеличения пропускных способностей канала ССС до 2 Мбит/с, а СВРС – до 34 Мбит/с. С учетом того, что минимальный требуемый канал для передачи мультимедийного трафика составит 16 кбит/с.

Проведем моделирование возможностей перспективной ОVKCC при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda=16$  кбит/с;
- количество абонентов СВРС  $M=1\dots 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;
- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C=34$  Мбит/с, для ССС-2 Мбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и ССС ( $D_{mes\ ССС}$ ) имеют равные значения-256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения  $K=K_{ССС}=16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max}=250$  км.

Результаты моделирования представлены на рис. 11-14.

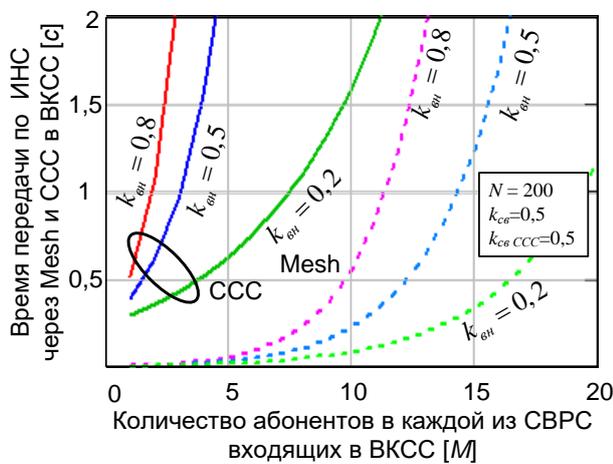


Рис. 11. Пропускная способность спутникового и воздушного сегментов ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена

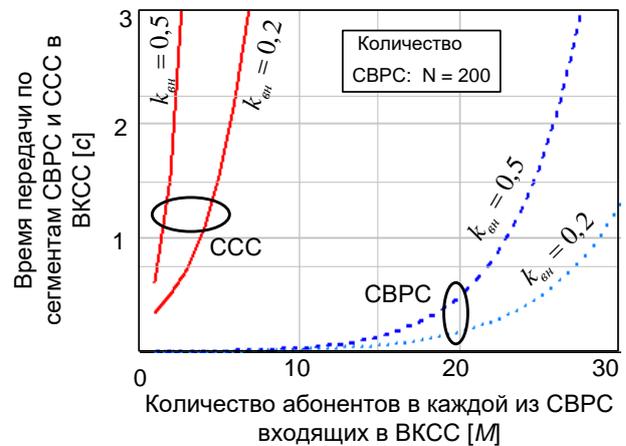
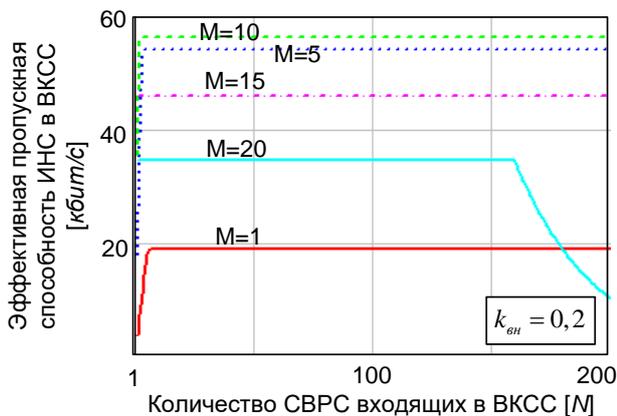
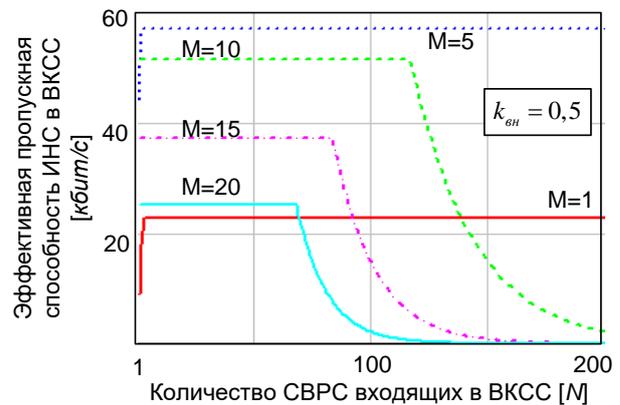


Рис. 12. Время передачи по спутниковому и воздушному сегментам ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена



а



б

Рис. 13. Пропускная способность ИНС в ОВКСС с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях  $k_{пр}$

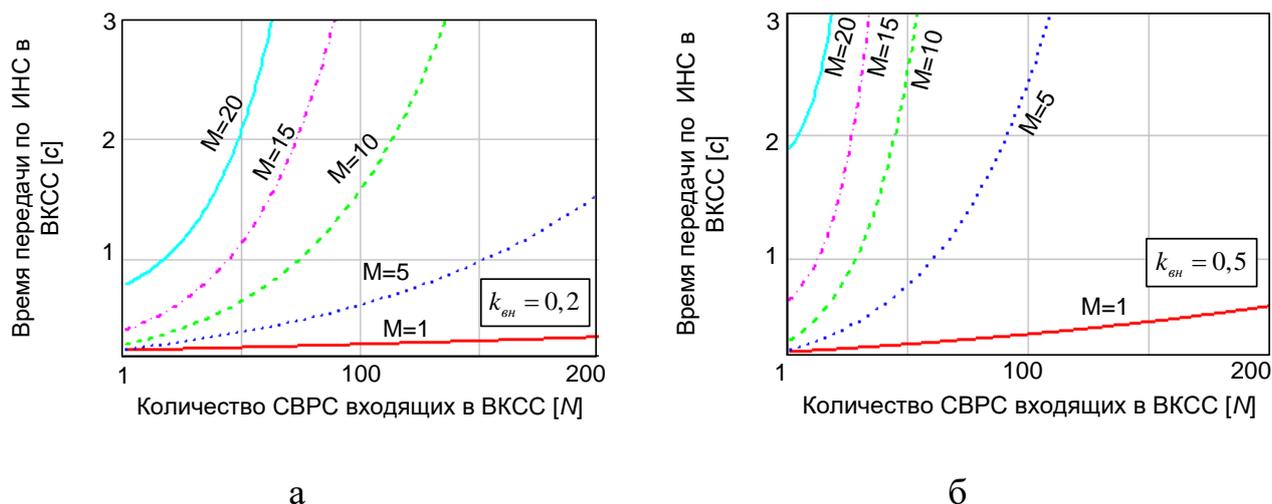


Рис. 14. Время задержки передачи по ИНС в ОVKCC с иерархическим принципом информационного обмена при различных значениях  $k_{вн}$

Анализ графиков на рис. 11-14 показывает, что факторы более низкой пропускной способности ССС и зависимость QoS ИНС от коэффициента внешнего трафика  $k_{вн}$  продолжают играть свою роль. Как видно на рис. 13 именно снижение пропускной способности ССС ведет к снижению пропускной способности ИНС после достижения критических значений соотношения абонентов  $M$  и числа СВРС  $N$ .

Анализ графиков на рис. 14 позволяет определить предельные возможности по структуре перспективной ОVKCC для передачи трафика реального времени ( $T_m < 0,6$  с):

при коэффициенте внешнего трафика до  $k_{вн} \leq 0,2$ :

- до 100 СВРС в каждой не более 5 абонентов по 16 кбит/с;
- до 50 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 16 кбит/с;
- до 30 СВРС в каждой не более 15 абонентов по 16 кбит/с;

при коэффициенте внешнего трафика до  $k_{вн} \leq 0,5$ :

- до 40 СВРС в каждой не более 5 абонентов по 16 кбит/с;
- до 17 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 16 кбит/с;
- до 2 СВРС в каждой не более 15 абонентов по 16 кбит/с.

### 3. Исследование качества обслуживания в объединенной воздушно-космической сети связи на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков

#### 3.1. Исследования при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи

Проведем оценку пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОVKCC с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков. При ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам современных средств связи [2-4]:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda=1,2$  кбит/с;
- количество абонентов СВРС  $M=1\dots 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;
- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C=48$  кбит/с, для CCC-13,3 кбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и CCC ( $D_{mes\ CCC}$ ) имеют равные значения-256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и CCC равны и имеют значения  $K=K_{CCC}=16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max}=250$  км.

Результаты моделирования представлены на рис. 15-18.

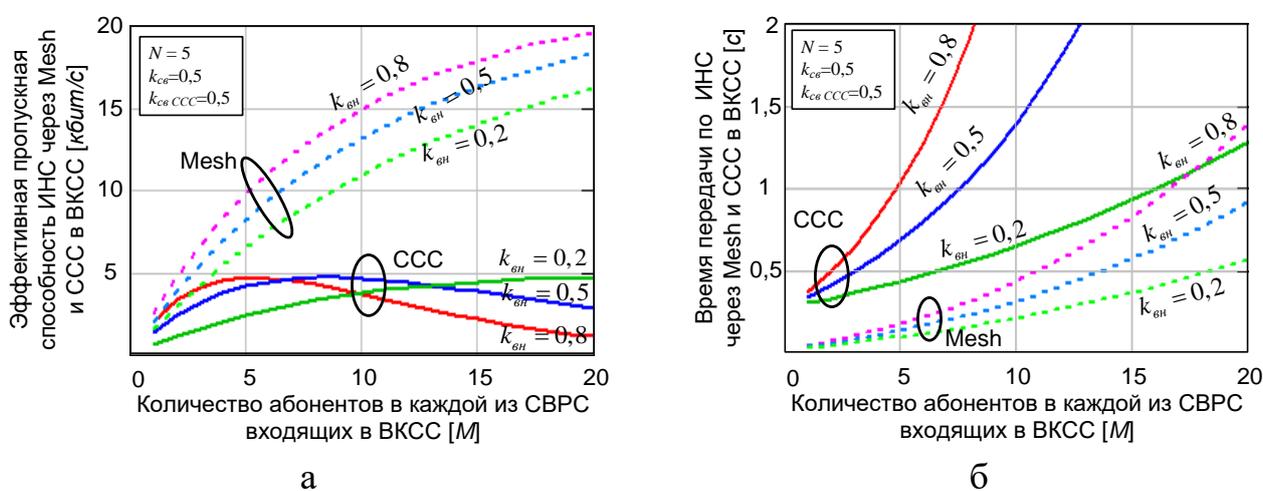


Рис. 15. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через CCC и через Mesh) в ОВКС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества абонентов  $M$

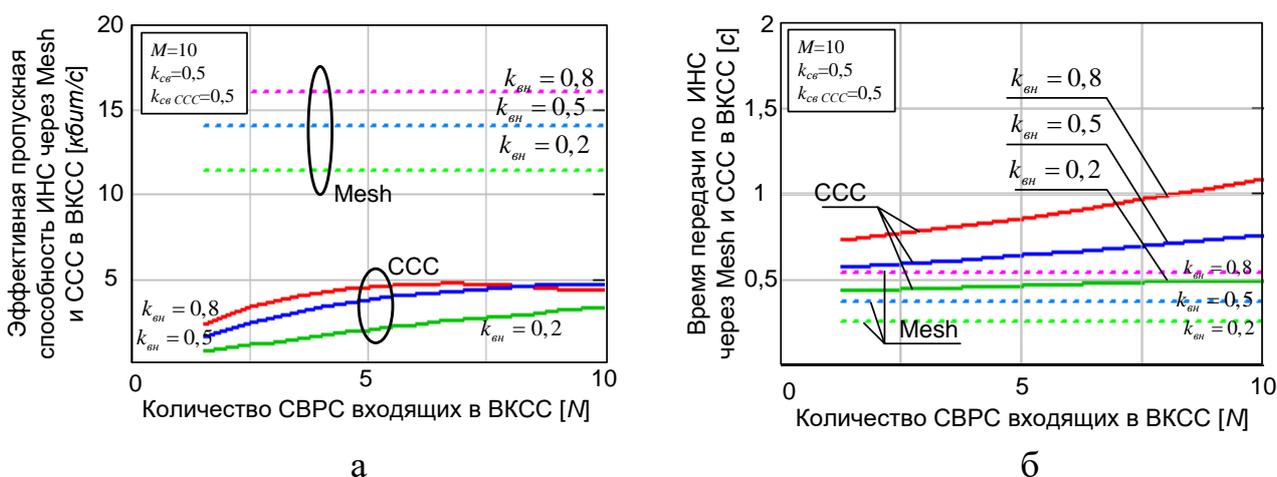


Рис. 16. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через CCC и через Mesh) в ОВКС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества сетей  $N$

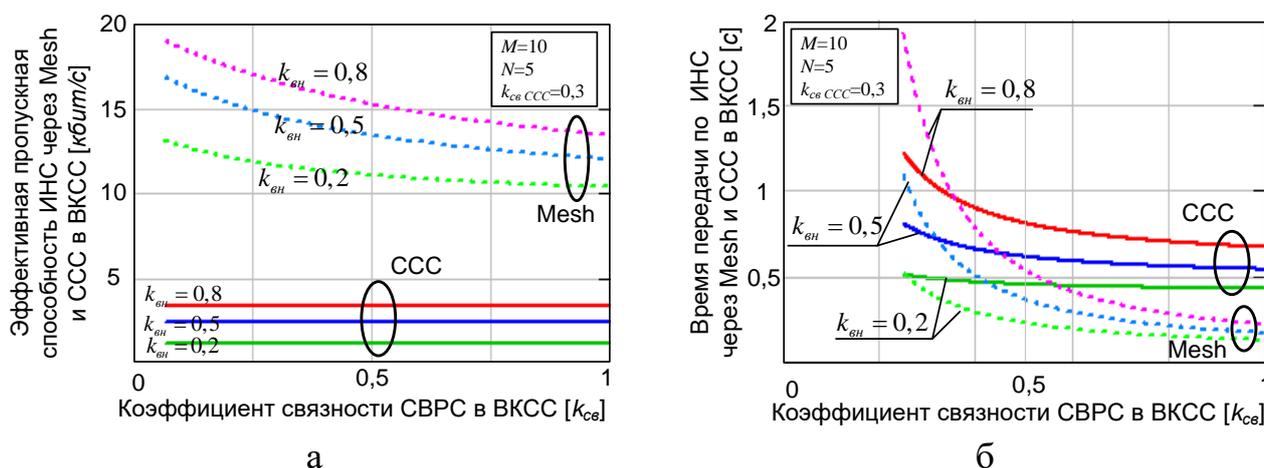


Рис. 17. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через CCC и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении связности СВРС

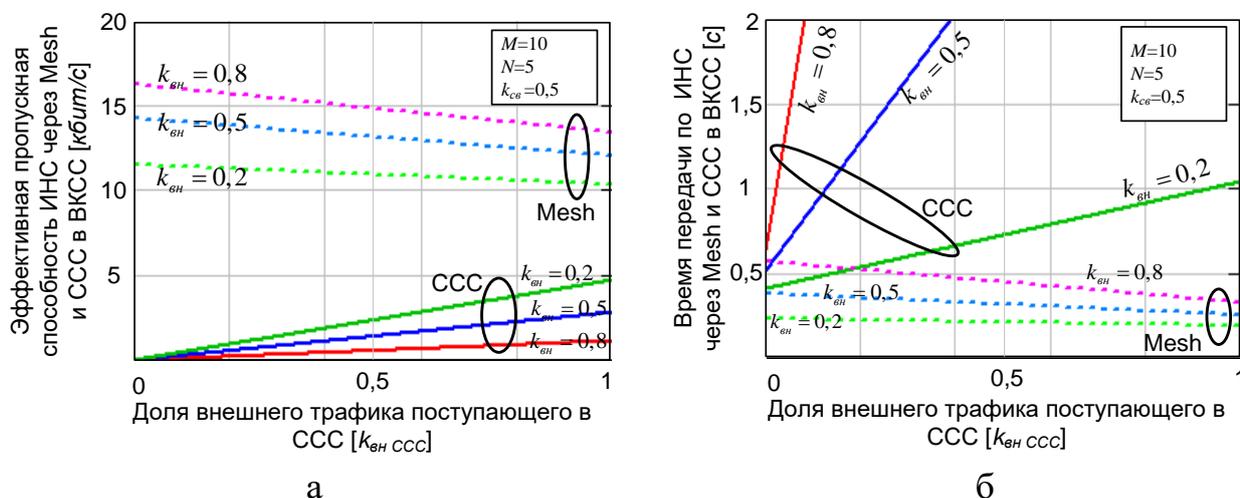


Рис. 18. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через CCC и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика поступающего в CCC

Анализ графических зависимостей на рис. 15-18 показывает, что в целом наиболее существенным фактором, определяющим QoS ИНС в ОВКСС продолжает оставаться коэффициент внешнего трафика  $k_{вн}$ . Однако использование Mesh-технологии объединений СВРС позволяет ретранслировать часть трафика в смежные СВРС (определяется коэффициентом  $k_{вн CCC}$ ), тем самым существенно разгрузить спутниковый сегмент ОВКСС и как следствие снизить время передачи сообщений по ИНС. При этом эффективность применения Mesh-технологий полностью определяется коэффициентом связности воздушных сетей  $k_{св}$ . Таким образом, внедрение Mesh-технологии без модернизации оборудования авиационной радиосвязи и перехода на более скоростные каналы связи не позволяет существенно изменить ситуацию с невозможностью построения ОВКСС ретрансляции трафика реального времени.

Предельные возможности по структуре ОВКСС для передачи мультимедийного трафика ( $T_m < 0,6$  с), при коэффициенте связности воздушного сегмента  $k_{св} \geq 0,5$ :

- до 10 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 1,2 кбит/с:
  - при коэффициентах внешнего трафика  $k_{вн} \leq 0,5$ ,  $k_{вн\ CCC} = 0$ ;
  - при коэффициентах внешнего трафика  $k_{вн} \leq 0,2$ ,  $k_{вн\ CCC} \leq 0,05$ ;
- до 5 СВРС в каждой не более 12 абонентов по 1,2 кбит/с:
  - при коэффициентах внешнего трафика  $k_{вн} \leq 0,5$ ,  $k_{вн\ CCC} = 0$ ;
  - при коэффициентах внешнего трафика  $k_{вн} \leq 0,2$ ,  $k_{вн\ CCC} \leq 0,05$ .

Таким образом, с одной стороны использование Mesh-технологии позволяет увеличить емкость ОВКСС и ее возможности по обслуживанию трафика реального времени, а с другой стороны, возникает множество вариантов балансировки трафика между воздушным и спутниковым сегментами ССС, что требует разработки отдельной методики балансировки нагрузки.

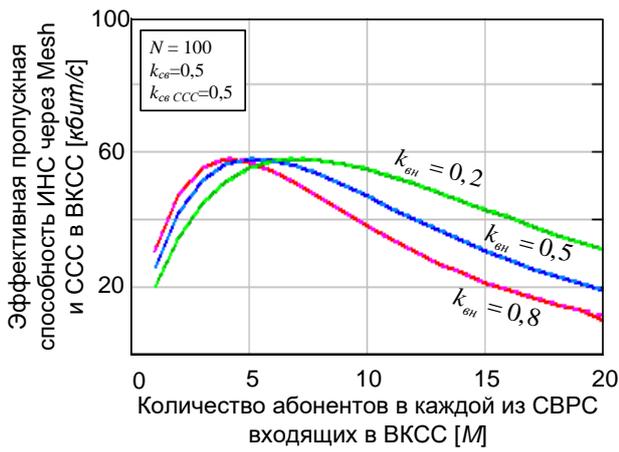
### 3.2. Исследование при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи

Рассмотрим возможности ОВКСС по обслуживанию мультимедийного трафика с учетом планируемого увеличения пропускных способностей канала ССС до 2 Мбит/с, а СВРС – до 34 Мбит/с. С учетом того, что минимальный требуемый канал для передачи мультимедийного трафика составит 16 кбит/с.

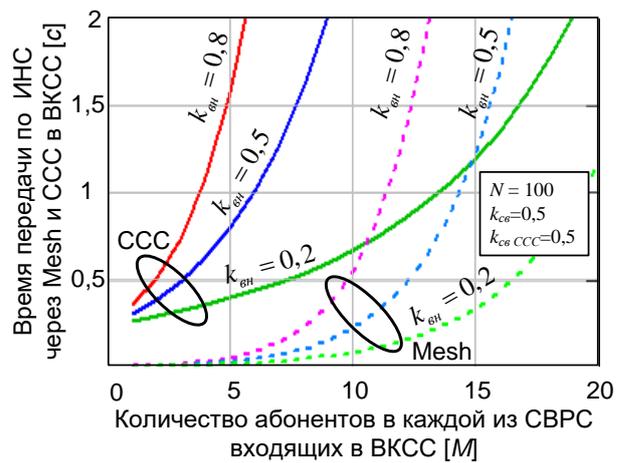
Проведем моделирование возможностей перспективной ОВКСС при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda = 16$  кбит/с;
- количество абонентов СВРС  $M = 1 \dots 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;
- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C = 34$  Мбит/с, для ССС – 2 Мбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и ССС ( $D_{mes\ CCC}$ ) имеют равные значения-256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения  $K = K_{ССС} = 16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max} = 250$  км.

Результаты моделирования представлены на рис. 19-22.

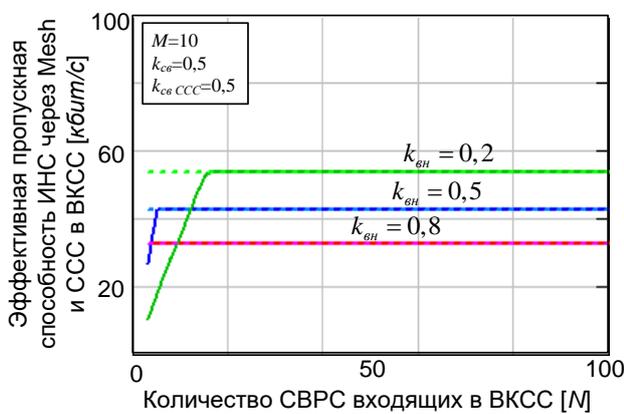


а

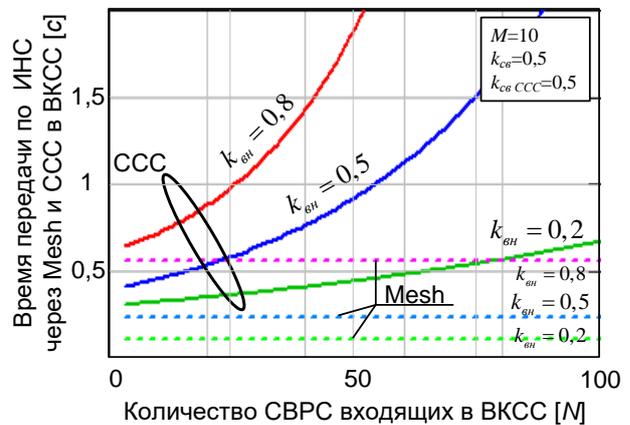


б

Рис. 19. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества абонентов  $M$

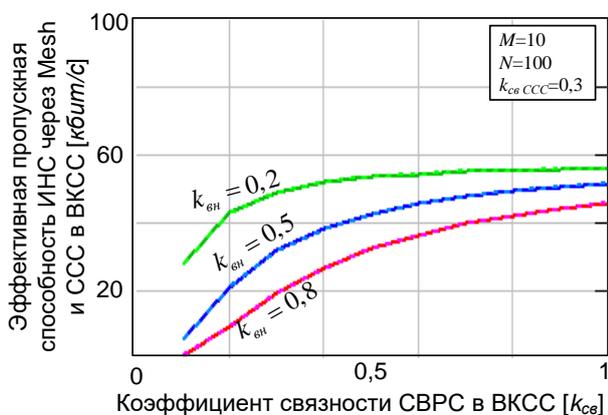


а

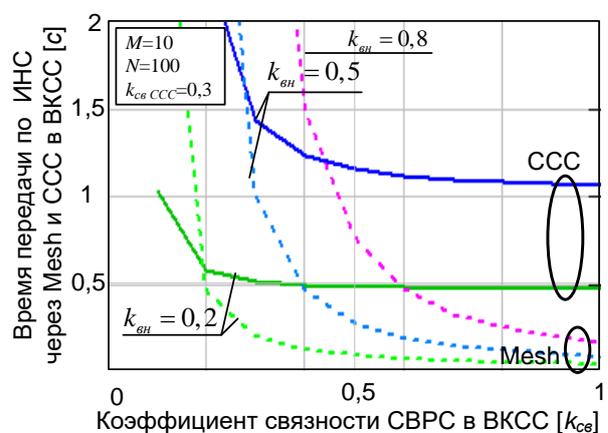


б

Рис. 20. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при различных значениях количества сетей  $N$



а



б

Рис. 21. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом передачи при изменении связности СВРС

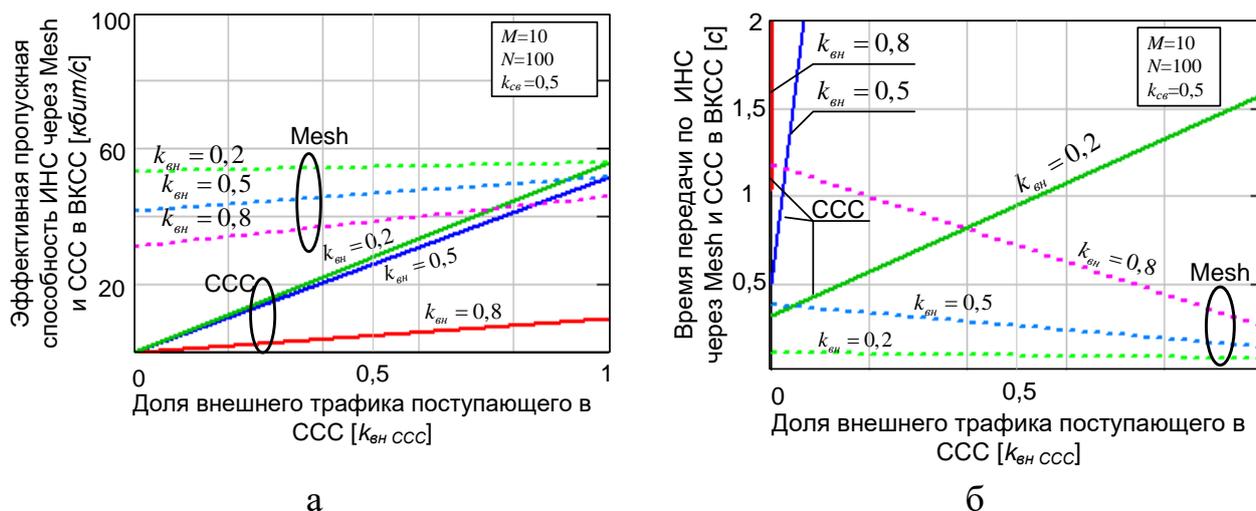


Рис. 22. Пропускная способность и время передачи по ИНС (через ССС и через Mesh-СВРС) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика поступающего в ССС

Анализ графиков на рис. 19-22 показывает, что в ОВКСС построенном на основе децентрализованного принципа информационного обмена в зависимости от коэффициентов  $k_{вн}$  и  $k_{вн\ CCC}$  звеном с наиболее низкой пропускной способностью может выступать как ССС так и воздушный сегмент ОВКСС (рис. 20а). При этом соотношение коэффициентов  $k_{вн}$  и  $k_{вн\ CCC}$  фактически определяют поведение всей системы.

Графические зависимости на рис. 19-22 позволяют определить предельные возможности по структуре перспективной ОВКСС для передачи трафика реального времени ( $T_m < 0,6$  с):

- при коэффициенте внешнего трафика до  $k_{вн} \leq 0,2$  ( $k_{вн\ CCC} \leq 0,15$ ,  $k_{св}=0,5$ ):
  - до 100 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 16 кбит/с;
  - до 70 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 16 кбит/с;
- при коэффициенте внешнего трафика до  $k_{вн} \leq 0,6$  ( $k_{вн\ CCC}=0$ ,  $k_{св}=0,5$ ):
  - до 200 СВРС в каждой не более 10 абонентов по 16 кбит/с.

#### 4. Сравнительный анализ качества обслуживания в объединенной воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков

Представим итоговые данные о повышении пропускной способности по показателю общего количества обслуживаемых абонентов за счет использования Mesh-технологий в ОВКСС в виде таблицы 1.

Анализ результатов, представленных в таблице 1, позволяет сделать вывод о том, что использование Mesh-технологий для объединения СВРС в воздушном сегменте, позволяет ретранслировать большую часть трафика ОВКСС через смежные СВРС и тем самым повысить пропускную способности ОВКСС по показателю одновременного числа обслуживаемых абонентов в 2...4 раза,

для современного авиационного оборудования связи и до 9 раз – для перспективного.

Таблица 1 – Повышение пропускной способности ОВКСС при переходе от иерархического к децентрализованному принципу ретрансляции информационных потоков

Параметры информационных потоков		ОВКСС (ССС)	ВКСС (ССС+Mesh, $k_{св}=0,5$ )	Прирост пропускной способности (в аб.)
Современное оборудование авиационной связи				
$\lambda=1,2$ кбит/с	$k_{вн} \leq 0,2$	4×5 аб.	10×10 аб.	до 400%
			5×12 аб.	до 200%
	$k_{вн} \leq 0,5$	-	10×10 аб.	$\infty$
			5×12 аб.	$\infty$
Перспективное оборудование авиационной связи				
$\lambda=16$ кбит/с	$k_{вн} \leq 0,2$	100×5 аб.	200×10 аб.	до 300%
		50×10 аб.		
	$k_{вн} \leq 0,5$	40×5 аб. 17×10 аб.	200×10 аб.	до 900%

Таким образом, использование Mesh технологии позволяет в разы повысить пропускную способность ВКСС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов, передающих мультимедийный трафик. Однако, такое повышение реализуется за счет использования избыточного ресурса пропускной способности СВРС и фактически ведет к ретрансляции подавляющей части трафика ОВКСС через воздушный сегмент. При этом, доли ретранслируемого трафика определяется параметрами  $k_{вн}$  и  $k_{вн\ СССР}$ , а время задержки еще и зависит от коэффициента связности  $k_{св}$  который напрямую определяет количество шагов ретрансляции.

### 5. Алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона

Предложен алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона основанный на разработанной методике распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи, который обеспечивает сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелона объединённой автоматизированной цифровой сети (ОАЦСС) и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений.

Алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи:

- разработан с учетом применения совместно с перспективным протоколом множественного доступа CSMA/CA, ориентированного на пакетную передачу цифровых потоков в воздушном эшелоне ОАЦСС и применяемым для ретрансляции информационных потоков в перспективных сетях воздушной радиосвязи;

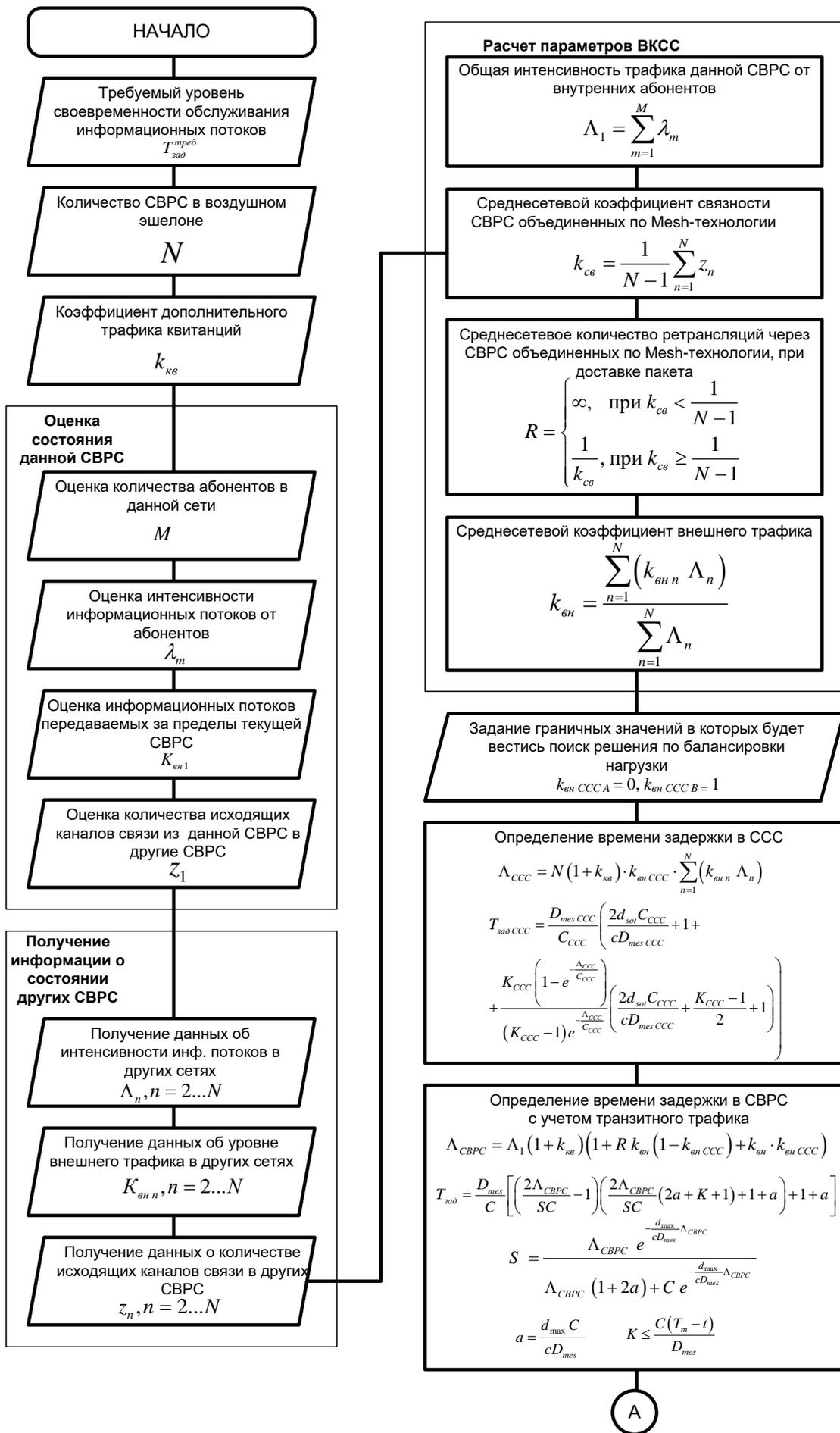
- разработан с учетом применения совместно с протоколом множественного доступа S-Aloha ориентированного на пакетную передачу цифровых потоков подвижных сетей связи в космическом эшелоне ОАЦСС;
- обеспечивает сопряжение полевых сетей связи наземного, воздушного и космического эшелона ОАЦСС и ретрансляцию по ним информационных потоков абонентов с заданным уровнем своевременности передачи сообщений.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 23.

Алгоритм состоит из следующих основных частей. В начале определяются параметры абонентов и интенсивности информационных потоков в текущей СВРС, а также доля информационных потоков, которые передаются в другие сети. Аналогичная информация запрашивается и получается из других СВРС. Наличие этих данных от всех СВРС воздушного эшелона позволяет оценить время задержки в спутниковом и воздушном сегменте в соответствии с выражениями, ранее полученными в модели воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции. Проводится оценка возможностей с заданной своевременностью вести передачу через воздушный и/или космический сегменты. В случае, если есть возможность вести передачу через оба сегмента, то рассчитав средние значения для коэффициента внешнего трафика, коэффициента связности СВРС в воздушном эшелоне, и ориентировочное время передачи по СВРС и ССС можно приступить к итерационной процедуре поиска значения коэффициента трафика, отправляемого в ССС в соответствии с методикой распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи. В конечном итоге, в результате работы алгоритма, мы получаем решение о сегментах, через которые ведется передача, а также значение распределения долей трафика между космическим и воздушным сегментами.

Данный алгоритм предлагается к реализации в составе математического обеспечения перспективных бортовых авиационных комплексов связи С-107, С-111, в состав которых входит спутниковая радиостанция ЕССС-3 и воздушные средства радиосвязи, функционирующие в режиме случайного мужественного доступа абонентов к КМД с пропускной способностью 34 Мбит/с.

Алгоритм распределения информационных потоков предлагается к реализации в составе математического обеспечения перспективного комплекса связи, в состав которых входит спутниковая радиостанция ЕССС-3 (со скоростью информационного обмена 2 Мбит/с) и воздушные средства радиосвязи, функционирующие в режиме случайного множественного доступа абонентов в канале с пропускной способностью 34 Мбит/с.



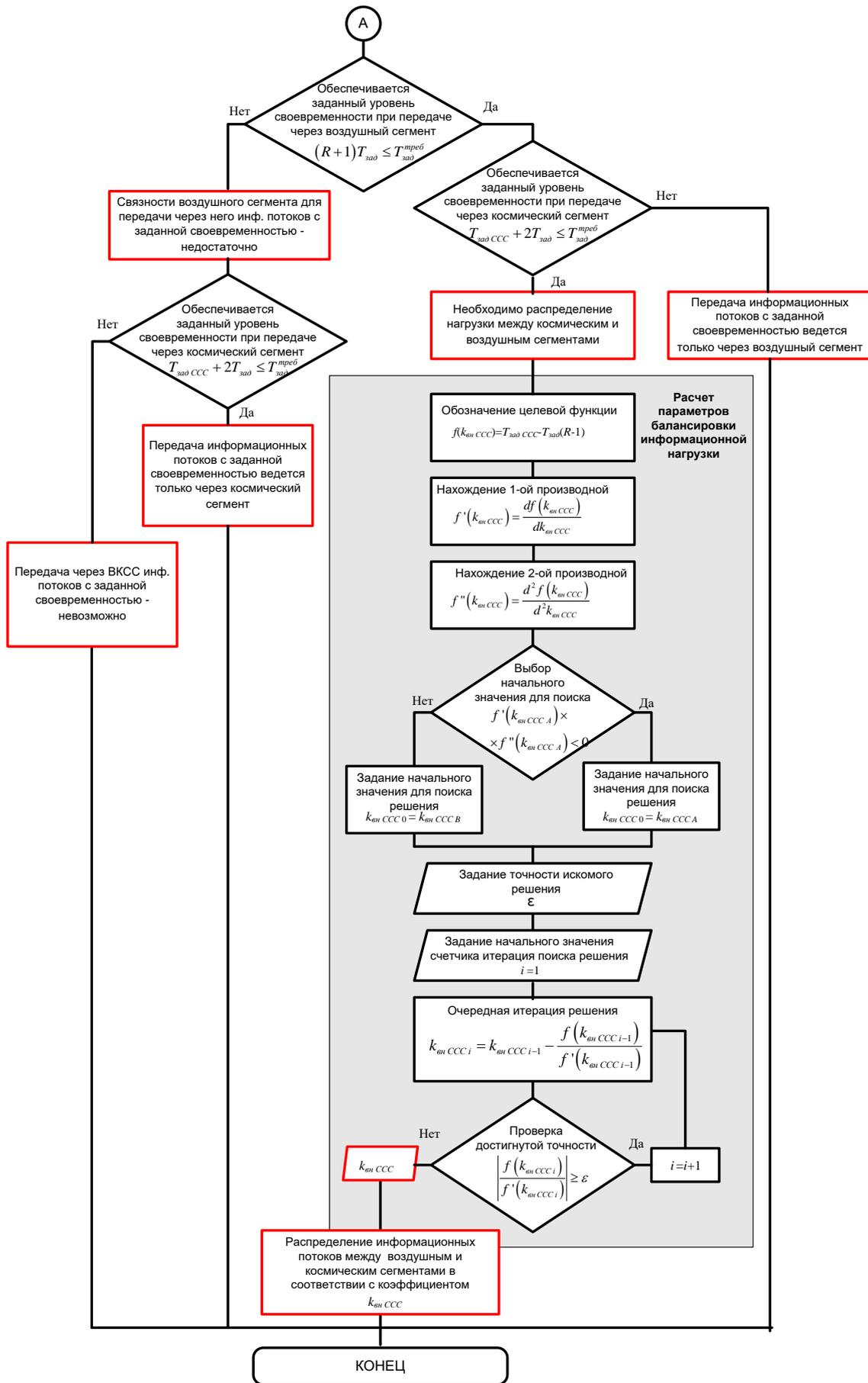


Рис. 23. Блок-схема алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона

## Выводы

В интересах достижения цели научного исследования – повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи, в работе поставлена и решена актуальная научная задача – развитие научно-методического аппарата повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи на основе использования Mesh-технологий. Научную новизну и теоретическую значимость разработанного научно-методического аппарата составляет:

- ранее не рассматриваемый объект исследования – объединенная воздушно-космическая сеть связи;
- обоснование нового подхода к ретрансляции информационных потоков в ОВКСС – на основе децентрализованного принципа, а также нового теоретического решения (методики) для распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту этой сети.

Прикладным результатом, имеющим практическую значимость, является алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла объединенной воздушно-космической сети связи, предлагаемый для реализации в бортовом комплексе связи.

Для ОВКСС обоснована целесообразность использования децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий, а также распределение информационных потоков по воздушному и космическому сегменту в соответствии с предложенной в работе методикой.

Использование децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий в объединенной воздушно-космической сети связи, позволяет ретранслировать большую часть ее трафика через смежные воздушные сети и тем самым повысить пропускную способность объединенной сети по показателю одновременного числа обслуживаемых абонентов в 2...4 раза, для современного авиационного оборудования связи и до 9 раз – для перспективного.

Для практической реализации децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков в объединенной воздушно-космической сети связи разработан алгоритм распределения информационных потоков для маршрутизатора узла ОВКСС, предлагаемый для реализации в бортовом комплексе связи.

## Литература

1. Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 183-259. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-183-259
2. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания

«Информационный мост», 2013. – 216 с. – URL: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (дата доступа 03.02.2017).

3. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. М.: «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.

4. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. – 816 с.

5. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97.

6. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4 (20). С. 43-51.

7. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 1. С. 7-16.

8. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно космической сети связи построенной на основе Mesh-технологии // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 1. С. 17-25.

9. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 99-134. URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-02/04-Aganesov.pdf> (дата обращения 01.09.2022).

10. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. №3. С. 92-121.

11. Иванов М. С., Пономарев А. В., Макаренко С. И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104-139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.

12. Иванов М. С., Пономарев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 120-147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

13. Иванов М. С., Понаморев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 2. Экстраполяция и прогнозирование интенсивности нестационарного трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 148-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172.

14. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на децентрализованном принципе ретрансляции информационных потоков // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 57-68. DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06

15. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН, основанная на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №3. С. 54-68.

16. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

17. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

19. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетевых технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.

20. Иванов М. С., Попов С. А. Применение теории сетевых войн войсками НАТО // Охрана, безопасность, связь. 2013. Т. 2. С. 157.

### References

1. Ivanov M. S., Aganesov A. V., Makarenko S. I. Bandwidth increasing the of a united aerospace communications network. Part 1. Models and method of bandwidth increasing of the united network with used Mesh-technologies. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 183-259 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-183-259

2. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii - 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation - 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: [www.informost.ru](http://www.informost.ru) (accessed 03 February 2017) (in Russian).

3. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

4. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

5. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 1 September 2022) (In Russian).

6. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. *Telecom IT*, 2015, no. 4, pp. 43-51 (In Russian).

7. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united airspace network with decentralized traffic routing based on mesh technologies. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 7-16 (In Russian).

8. Aganesov A. V., Makarenko S. I. The traffic balancing method between aero and space segments in aerospace network based on Mesh-technology. *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17-25 (In Russian).

9. Aganesov A. V. Model of Satellite Network with S-Aloha Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 2, pp. 99-134. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-02/04-Aganesov.pdf> (accessed 1 September 2022) (In Russian).

10. Aganesov A. V. Quality of Service of Aerospace Network Based on Hierarchical and Decentralized Routing Protocols. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 3, pp. 92-121 (In Russian).

11. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Increasing data transmission rate technique in an aerial radio communication network for control of aircrafts through the adaptive frequency-time network resource distribution taking into account the transmitted teletraffic intensity. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 1, pp. 104-139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139 (in Russian).

12. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 1. Non-stationary teletraffic intensity model at various flight stages. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 120-147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147 (in Russian).

13. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 2. Extrapolation and forecasting of the intensity of non-stationary traffic. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 148-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172 (in Russian).

14. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov A. S. AWACS guided integrated aircraft control radio network based on decentralized routing.

*Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 57-68 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06.

15. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. Integral radio network of aircrafts control from AWACS, based on the hierarchical principle of routing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 54-68 (in Russian).

16. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Guards, security, communication*, 2017, no. 1-1, pp. 196-203 (in Russian).

18. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using mesh technology in interworking systems. *Theory and technology of radio communication*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

19. Bogdanov A E., Popov S. A., Ivanov M. S. Prospects of warfare using network-centric technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).

20. Ivanov M. S., Popov S. A. Primenenie teorii setecentricheskikh vojn vojskami NATO [Application of the theory of network-centric wars by NATO troops]. *Guards, security, communication*, 2013, Vol. 2, pp. 157 (in Russian).

Статья поступила 20 сентября 2022 г.

### Информация об авторах

*Иванов Максим Сергеевич* – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: point\_break@rambler.ru

Адрес: 394074, Россия, Воронеж, Старых Большевиков, д. 54а.

*Аганесов Артур Валерьевич* – соискатель ученой степени кандидата наук. Помощник начальника учебного отдела. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: маршрутизация информационных потоков и ретрансляция сообщений в воздушно-космических сетях связи. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

*Макаренко Сергей Иванович* – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

## Bandwidth increasing of a joint aerospace communications network

### Part 2. Studying of bandwidth increasing in a joint aerospace communications network and developing an information flows distribution algorithm for an air network router

M. S. Ivanov, A. V. Aganesov, S. I. Makarenko

**Problem statement:** *The Aerospace forces of Russia are used to solve the special military tasks in abroad, where global controlling of aircraft is not always possible. The global control of aircraft can be achieved by coupling the air radio communication networks (ARCN) for aviation control through the satellite communication systems (SatComm) due to SatComm provide global coverage over the entire territory of the Earth. At the same time, such coupling needs the solution some technological tasks, such as: the coordination of data exchange rates, the development of network protocols for the joint functioning of ARCN and SatComm, the development of routing protocols, as well as the ways for high bandwidth of air and space radio networks. There are models and a method of decentralized routing of information flows in a Joint AeroSpace Communications Network (JASCN) in first part of this work. **The aim of this paper** is to study of bandwidth increasing in JASCN and to develop an information flows distribution algorithm for an air network node router. **Novelty.** Elements of the algorithm novelty are the joint consideration of both air radio subnetworks specifics, as well as used of the Newton method to obtain a solution for balancing and routing traffic in JASCN. **Result of the study** shows that using of Mesh technologies to joint ARCN in an air segment allows JASCN to retransmit the most of traffic through adjacent ARCNS and thereby increase the JASCN bandwidth in terms of the number of simultaneously serviced subscribers by 2-4 times, for modern aviation communication equipment and up to 9 times – for promising equipment. **Practical significance:** using of the information flows distribution algorithm for an air network node router, which are showed in this paper, allows achieving high bandwidth of JASCN and global control for aircraft of the Russian Aerospace Forces.*

**Keywords:** *air radio communication networks, satellite communication system, communication organization, military aviation, aircraft control.*

#### Information about Authors

*Maxim Sergeevich Ivanov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and J. A. Gagarin”. Field of research: systems and networks aeronautical radio communication. E-mail: point\_break@rambler.ru

Address: 394074, Russia, Voronezh, Old Bolsheviks str., 54a.

*Artur Valerevich Aganesov* – Doctoral Student. Assistant of head of training department. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy Named After Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin”. Field of research: traffic routing and message relay in aerospace communication networks; Mesh-networks. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Address: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Leading Researcher. St. Petersburg Federal research center of the Russian Academy of Sciences. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: makserg@yandex.ru

Address: 197376, Russia, Saint Petersburg, 14th Linia, 39.