

УДК 004.722

## Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН, основанная на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков

Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А.

**Актуальность.** В начале XXI века Воздушно-космические войска России столкнулись с необходимостью управления авиацией на удаленных театрах военных действий, не оборудованных наземной инфраструктурой управления и связи. В этом случае управление авиацией осуществляется с борта авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) который выступает в качестве воздушного пункта управления, а также центрального элемента единой сети воздушной радиосвязи. Однако высокая интенсивность полетов, большое количество воздушных судов, одновременно управляемых с борта АК РЛДН, выявило необходимость более рационального использования ресурсов такой единой радиосети для управления авиацией. В частности, одной из наименее теоретически и практически проработанных оказалась задача организации рациональной ретрансляции команд и информационных сообщений в единой радиосети АК РЛДН при одновременном обеспечении заданного качества обслуживания ее абонентов. **Целью статьи является разработка модели единой сети воздушной радиосвязи АК РЛДН, построенной на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Новизна.** К элементам новизны модели единой сети воздушной радиосвязи, относится то, что данная модель формализует организацию связи с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН. При этом АК РЛДН является доминирующим источником трафика в единой сети. Единая сеть имеет сложную двухуровневую структуру, основу которой на верхнем уровне составляет подсеть АК РЛДН для управления группами летательными аппаратами, а нижний уровень сети образован отдельными подсетями для обмена данными внутри этих групп. **Практическая значимость работы.** На основании представленной модели в дальнейшем предполагается провести моделирование различных способов организации связи в единой сети радиосвязи с целью обоснованного выбора наиболее рационального способа и его внедрения в математическое обеспечение подсистемы связи АК РЛДН.

**Ключевые слова:** сеть воздушной радиосвязи, авиация, ретрансляция, маршрутизация, организация связи, военная авиация, АК РЛДН.

### Введение

Опыт боевого применения Воздушно-космических сил (ВКС) России в Сирии показал, что управление авиацией на удаленных театрах военных действий (ТВД), не оборудованных наземной инфраструктурой управления и связи требует разработки новых решений по организации связи, в том числе вариантов управления авиацией с борта авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) [1-3]. В работах [4-6] рассматривался вариант организации глобальной воздушно-космической системы связи для управления

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

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. 2018. № 3. С. 54-68. URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-03/04-Smirnov.pdf>

#### Reference for citation:

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. Available at: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-03/04-Smirnov.pdf> (in Russian).

авиацией. Однако такой вариант имеет существенные недостатки – недостаточная пропускная способность и высокая задержка передачи данных через спутниковый сегмент сети. Это является особенно критичным при управлении беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), а также при боевом применении фронтовой авиации в масштабе времени близком к реальному. На практике в операции ВКС России в Сирии использовался вариант управления авиацией с борта АК РЛДН. При этом АК РЛДН выступает в качестве воздушного пункта управления разнородной группировкой летательных аппаратов (ЛА), а также в качестве центрального элемента единой сети воздушной радиосвязи (ЕСВРС) на ТВД. В этом случае на АК РЛДН возлагаются задачи распределения связных ресурсов ЕСВРС, организации отдельных сетей воздушной радиосвязи (СВРС) для управления группами ЛА и БПЛА. Отдельные проблемные вопросы организации ЕСВРС на основе АК РЛДН рассмотрены в работах [7, 8]. При этом, как показано в этих работах, вопросы обеспечения электромагнитной совместимости при организации связи на ТВД являются в достаточной степени теоретически и практически проработанными, однако методологические и практические вопросы рациональной ретрансляции команд и информационных сообщений между отдельными СВРС при одновременном обеспечении заданного уровня качества обслуживания (QoS - Quality of Service) трафика абонентов (ЛА и БПЛА) в ЕСВРС – проработаны в недостаточной степени.

В данной статье рассмотрен вопрос разработки модели ЕСВРС, построенной на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Схема такой ЕСВРС представлена на рис. 1.

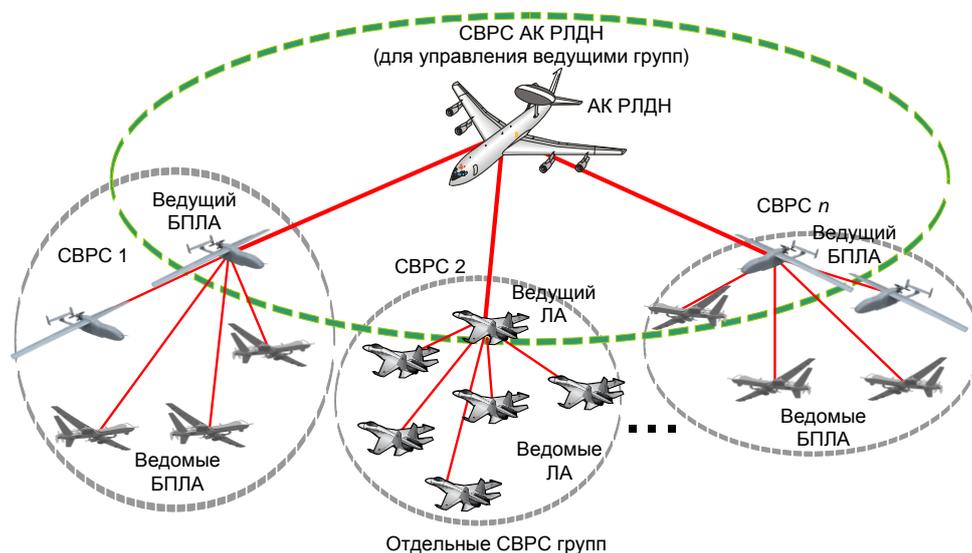


Рис. 1. ЕСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

Центральным элементом ЕСВРС является СВРС АК РЛДН которая связывает ведущих групп ЛА или БПЛА. В свою очередь каждый из ведущих группы образует свою СВРС для передачи команд и данных ведомым ЛА и БПЛА внутри группы. В основу модели ЕСВРС были положены работы [9-11] в которых рассматриваются модели отдельные модели СВРС, а именно модель на

основе протокола CSMA/CA. На основе модели ЕСВРС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков предлагается исследовать QoS трафика, предельные возможности сети по количеству обслуживаемых абонентов (ЛА и БПЛА), а также выработать рекомендации по переходу к децентрализованному принципу организации ЕСВРС. Проводимое исследование особо актуально в связи с необходимостью управления БПЛА [12], когда отсутствует возможность автономного управления, как на пилотируемых ЛА.

### Постановка задачи на моделирование

Для формализации процессов передачи трафика в ЕСВРС с иерархическим принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

$M_n$  – количество абонентов  $n$ -й СВРС;

$C_n$  – пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -й СВРС [бит/с];

$C_{AK\text{ РЛДН}}$  – пропускная способность канала множественного доступа СВРС АК РЛДН [бит/с];

$S_n$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -й СВРС нормированная к  $C_n$ ;

$S_{AK\text{ РЛДН}}$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа СВРС АК РЛДН нормированная к  $C_{ССС}$ ;

$C_{en}$  – эффективная пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -й СВРС [бит/с];

$C_{e\text{ АК РЛДН}}$  – эффективная пропускная способность канала множественного доступа СВРС АК РЛДН [бит/с];

$C_{e\text{ ИНС}}$  – эффективная пропускная способность ИНС в ЕСВРС [бит/с];

$D_{mes\ n}$  – объем пакета в  $n$ -й СВРС [бит];

$D_{mes\text{ АК РЛДН}}$  – объем пакета в ССС [бит];

$d_{max\ n}$  – радиус сети  $n$ -й СВРС [км];

$d_{max\text{ АК РЛДН}}$  – радиус сети СВРС АК РЛДН [км];

$c$  – скорость распространения электромагнитных волн [км/с];

$K_n$  – настойчивость протокола множественного доступа  $n$ -й СВРС, определяется как число попыток передачи пакета, в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{AK\text{ РЛДН}}$  – настойчивость протокола множественного доступа в СВРС АК РЛДН;

$\lambda_{m,n}$  – интенсивность трафика поступающего от  $m$ -го абонента  $n$ -й СВРС [бит/с];

$\lambda_{AK\text{ РЛДН}}$  – интенсивность трафика, поступающего от АК РЛДН [бит/с];

$k_{вн\ n}=0\dots 1$  – коэффициент внешнего трафика  $n$ -й СВРС, определяется как доля трафика  $n$ -й СВРС передаваемого через СВРС АК РЛДН;

$k_{вн\ n,j}=0\dots 1$  – коэффициент внешнего трафика направляемого из  $n$ -й СВРС в  $j$ -ю СВРС через СВРС АК РЛДН;

$k_{вн\ n\text{ АК РЛДН}}=0\dots 1$  – коэффициент внешнего трафика направляемого от АК РЛДН в  $n$ -ю СВРС через ведущего  $n$ -й группы к другим ведомым ЛА и БПЛА этой же группы;

$k_{кв}=0...1$  – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержания квитанции об успешном приеме пакета. Значение  $k_{кв}=0,1$  соответствует случаю когда на окно из 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

$\Lambda_n$  – интенсивность трафика в  $n$ -й СВРС, без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика поступающего в эту СВРС [бит/с];

$\Lambda_{АК РЛДН}$  – общая интенсивность трафика в СВРС АК РЛДН, с учетом трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];

$\Lambda_{СВРС n}$  – общая интенсивность трафика в  $n$ -й СВРС, с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];

$T_{зад n}$  – задержка передачи пакета в  $n$ -й СВРС [с];

$T_{зад АК РЛДН}$  – задержка передачи пакета в СВРС АК РЛДН [с];

$T_{зад ИНС}$  – задержка передачи пакета по ИНС в ЕСВРС [с].

Отметим, что нижний индекс  $n$  в вышеуказанных обозначениях, соответствует отдельным СВРС групп ЛА или БПЛА. Нижний индекс «АК РЛДН» соответствует центральной сети в составе ЕСВРС – СВРС АК РЛДН, которая предназначена для передачи команд и данных ведущим групп ЛА или БПЛА, а через них – их ведомым.

Рамки исследования:

- а) протокол связи в СВРС – протокол на основе алгоритма случайного множественного доступа (АМСД), который представлен в работе [9];
- б) все отдельные СВРС групп соединены через СВРС АК РЛДН по принципу «звезды»;
- в) команды и данные информационного обеспечения ЛА и БПЛА передаваемые в ЕСВРС образуют пакетный трафик представляющий собой простейший пуассоновский поток отдельных пакетов;
- г) АК РЛДН является доминирующим абонентом ЕСВРС.

Целью работы является вывод формализованных выражений для показателей QoS ЕСВРС, а именно:

- 1) для показателя пропускной способности ЕСВРС – эффективной пропускной способности информационного направления связи (ИНС)  $C_e ИНС$ ;
- 2) для показателя своевременности связи в ЕСВРС – времени задержки передачи пакета по ИНС  $T_{зад ИНС}$ .

### **Общая модель единой сети воздушной радиосвязи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков**

Для получения начальных условий с целью расчета параметров своевременности и пропускных способностей ИНС в ЕСВРС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных подсетях.

В каждой  $n$ -й СВРС управления группой ЛА от абонентов в данную сеть поступает поток с интенсивностью:

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m. \quad (1)$$

Из каждой  $n$ -й сети СВРС в другие СВРС через центральную СВРС АК РЛДН отправляется поток с интенсивностью определяемой коэффициентом  $k_{вн n}$ :

$$k_{вн n} \Lambda_n, \quad (2)$$

где  $k_{вн n} = \sum_{j=1}^N k_{вн n, j}$ , при этом в данной сумме  $k_{вн n, n} = 0$ .

Также в каждую  $n$ -ю сеть СВРС из других  $j$ -ых СВРС через СВРС АК РЛДН отправляется поток внешнего трафика равный:

$$\sum_{j=1}^N k_{вн j, n} \Lambda_j, \quad (3)$$

при этом в данной сумме  $k_{вн n, n} = 0$ .

Таким образом, интенсивность трафика циркулирующего в произвольной  $n$ -й сети СВРС отдельной группы будет:

$$\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{вн j, n} \Lambda_j + k_{вн n АК РЛДН} \lambda_{АК РЛДН}. \quad (4)$$

В этом выражении учитывается доля трафика  $k_{вн n АК РЛДН} \lambda_{АК РЛДН}$  от АК РЛДН (который является доминирующим абонентом ЕСВРС) поступающая в  $n$ -ю СВРС.

Рассмотрим трафик, поступающий в центральную СВРС АК РЛДН. Интенсивность этого трафика с учетом, того, что при иерархической системе обмена информацией все межсетевые соединения «СВРС-СВРС» идут через центральную СВРС АК РЛДН, будет равно:

$$\sum_{n=1}^N k_{вн n} \Lambda_n. \quad (5)$$

Схема распределения интенсивности трафика циркулирующего в ЕСВРС без учета трафика квитирования представлена на рис. 2. При этом абонент № 1 в каждой СВРС соответствует ведущему в группе ЛА (БПЛА) и входит как в состав СВРС своей группы, так и в СВРС АК РЛДН.

Если учесть, что на каждые  $\nu$  пакетов в ЕСВРС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен  $k_{кв} = 1/\nu$ . С учетом этого выражения (4) и (5) примут окончательный вид:

- а) интенсивность трафика циркулирующего в произвольной  $n$ -й СВРС управления группой ЛА (БПЛА):

$$\Lambda_{СВРС n} = (1 + k_{кв}) \left( \Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{вн j, n} \Lambda_j + k_{вн n АК РЛДН} \lambda_{АК РЛДН} \right), \quad (6)$$

- б) интенсивность трафика в центральной СВРС АК РЛДН с учетом того, что в эту сеть поступает трафик  $\lambda$  АК РЛДН от доминирующего абонента ЕСВРС – АК РЛДН:

$$\Lambda_{АК РЛДН} = (1 + k_{кв}) \left( \lambda_{АК РЛДН} + \sum_{n=1}^N k_{вн n} \Lambda_n \right). \quad (7)$$

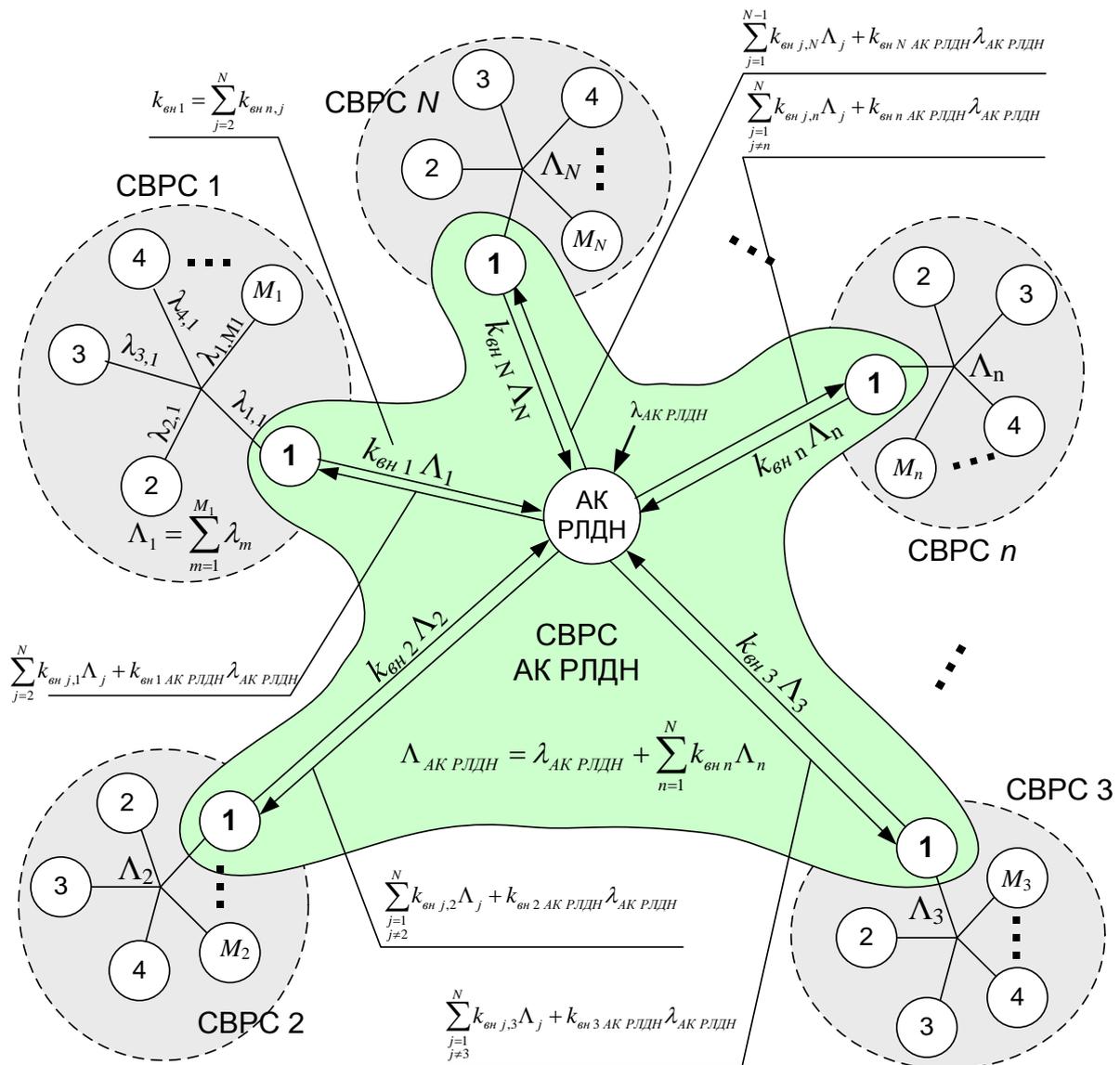


Рис. 2. Схема распределения интенсивностей информационного трафика циркулирующего в ЕСВРС

Рассмотрим время передачи сообщений в ЕСВРС. Общий вид ИНС в ЕСВРС с иерархическим принципом информационного обмена представлен на рис. 3.

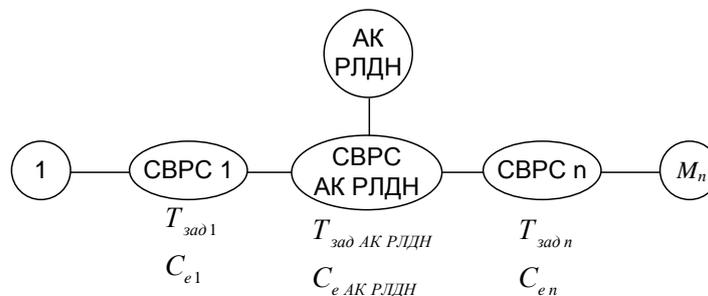


Рис. 3. Общая схема ИНС в ЕСВРС

В ИНС, представленной на рис. 3, время задержки передачи пакета между двумя любыми абонентами  $n$ -й и  $j$ -й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад } n} + T_{\text{зад АК РЛДН}} + T_{\text{зад } j}.$$

При этом как показано в работе [9] время задержки пакета при передаче по всем отдельным звеньям с учетом выражений (6) и (7) будет определяться как:

1) для отдельных СВРС управления группой ЛА (БПЛА) на основе АСМД:

$$T_{\text{зад } n} = \frac{D_{\text{mes } n}}{C_n} \left[ \left( \frac{2\Lambda_{\text{СВРС } n}}{S_n C_n} - 1 \right) \left( \frac{2\Lambda_{\text{СВРС } n}}{S_n C_n} (2a_n + K_n + 1) + 1 + a_n \right) + 1 + a_n \right].$$

где:

$$S_n = \frac{\Lambda_{\text{СВРС } n} e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{\text{СВРС } n}}}{\Lambda_{\text{СВРС } n} (1 + 2a_n) + C_n e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{\text{СВРС } n}}}, \quad a_n = \frac{d_{\text{max } n} C_n}{cD_{\text{mes } n}}, \quad K_n \leq \frac{C_n (T_m - t)}{D_{\text{mes } n}}.$$

2) для центральной СВРС АК РЛДН управления ведущими групп ЛА (БПЛА):

$$T_{\text{зад АК РЛДН}} = \frac{D_{\text{mes АК РЛДН}}}{C_n} \left[ \left( \frac{2\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}{S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{2\Lambda_{\text{АК РЛДН}}}{S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}} (2a_{\text{АК РЛДН}} + K_{\text{АК РЛДН}} + 1) + 1 + a_{\text{АК РЛДН}} \right) + 1 + a_{\text{АК РЛДН}} \right],$$

где:

$$S_{\text{АК РЛДН}} = \frac{\Lambda_{\text{АК РЛДН}} e^{-\frac{d_{\text{max АК РЛДН}}}{cD_{\text{mes АК РЛДН}} \Lambda_{\text{АК РЛДН}}}}}{\Lambda_{\text{АК РЛДН}} (1 + 2a_{\text{АК РЛДН}}) + C_{\text{АК РЛДН}} e^{-\frac{d_{\text{max АК РЛДН}}}{cD_{\text{mes АК РЛДН}} \Lambda_{\text{АК РЛДН}}}}}, \\ a_{\text{АК РЛДН}} = \frac{d_{\text{max АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}}{cD_{\text{mes АК РЛДН}}}, \quad K_{\text{АК РЛДН}} \leq \frac{C_{\text{АК РЛДН}} (T_m - t)}{D_{\text{mes АК РЛДН}}}.$$

Эффективная пропускная способность ИНС в ЕСВРС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью звена ИНС:

$$C_{e \text{ ИНС}} = \min \{ C_{e n}, C_{e \text{ ССС}}, C_{e j} \},$$

при этом как показано в работе [9] эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений (6) и (7) будут определяться как:

1) для произвольной  $n$ -й СВРС на основе алгоритма АСМД:

$$C_{e n} = S_n C_n,$$

2) для центральной СВРС АК РЛДН:

$$C_{e \text{ АК РЛДН}} = S_{\text{АК РЛДН}} C_{\text{АК РЛДН}}.$$

При этом параметры  $S_n$ ,  $S_{\text{АК РЛДН}}$ ,  $C_n$  и  $C_{\text{АК РЛДН}}$  определяются так же, как и в выражениях для времени задержки передачи пакета по СВРС.

Значения параметров  $T_{\text{зад ИНС}}$  и  $C_{e \text{ ИНС}}$  формируют показатели QoS абонентов (ЛА и БПЛА) в ЕСВРС. Общая схема вычисления показателей QoS для модели ЕСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков представлена на рис. 4.

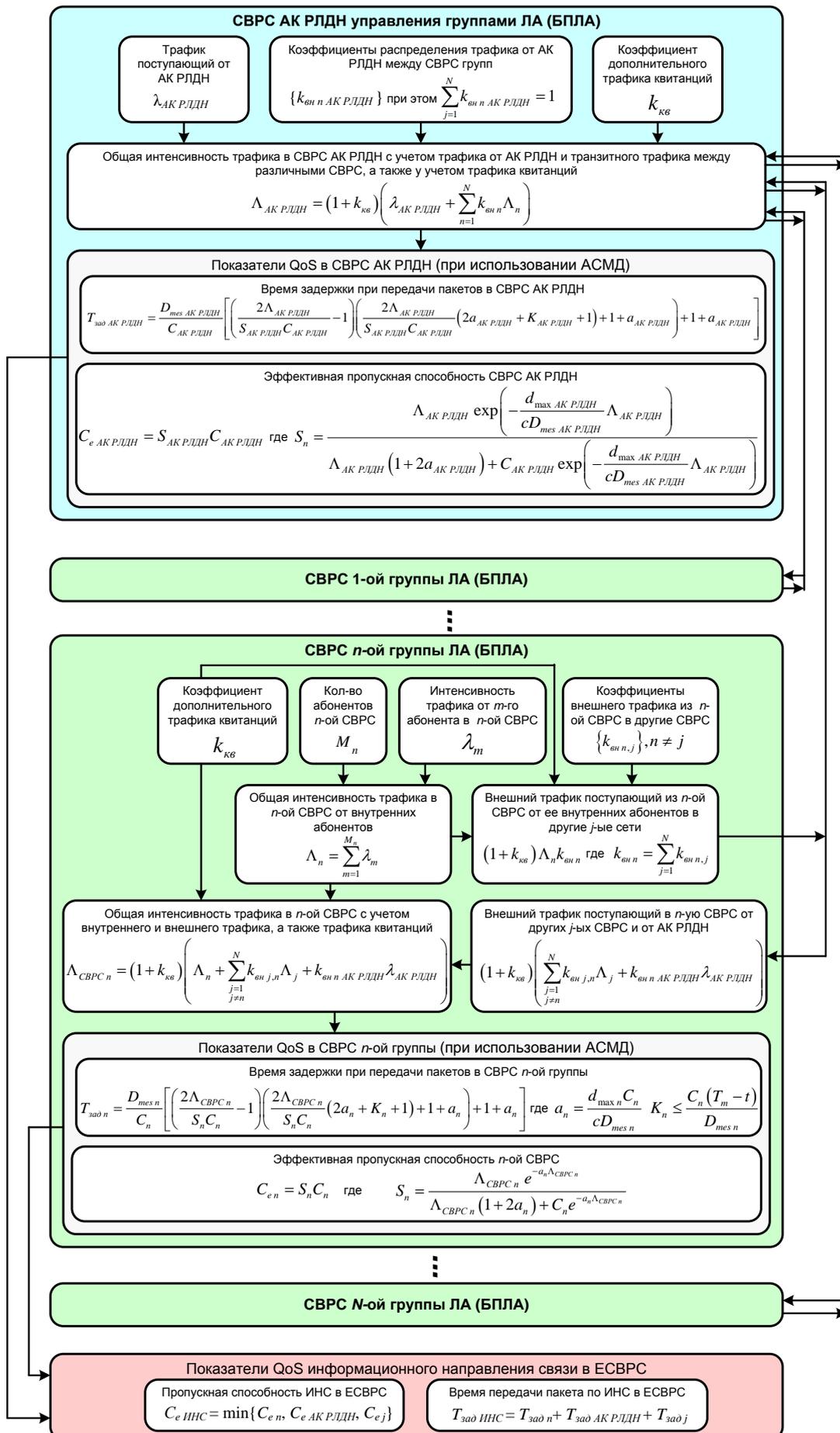


Рис. 4. Общая схема аналитических вычислений для модели ЕСВРС

### Упрощенная модель единой сети воздушной радиосвязи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Для концептуальной оценки показателей QoS ЕСВРС возможно упрощение вышепредставленной модели. В основу упрощенной модели положены следующие дополнительные допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС управления группами ЛА (БПЛА), так и имеет равную интенсивность  $\Lambda_1$ ;
- все СВРС как управления группами ЛА (БПЛА), так и СВРС АК РЛДН имеют равные значения параметров: объема пакета, радиуса сети, коэффициента настойчивости протокола равные соответственно –  $D_{mes}$ ,  $d_{max}$ ,  $K$ ;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС управления группами ЛА (БПЛА) одинаков и равен  $k_{вн}$ , причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям  $СВРС_i \rightarrow СВРС_j$  имеют равные значения:  $k_{вн\ i,j} = k_{вн}/(N-1)$ .
- коэффициенты внешнего трафика от АК РЛДН равны для всех СВРС управления группами ЛА (БПЛА)  $k_{вн\ n\ АК\ РЛДН} = 1/N$ ,  $n=1..N$ . То есть, трафик от АК РЛДН равномерно распределяется между всеми СВРС групп ЛА (БПЛА).

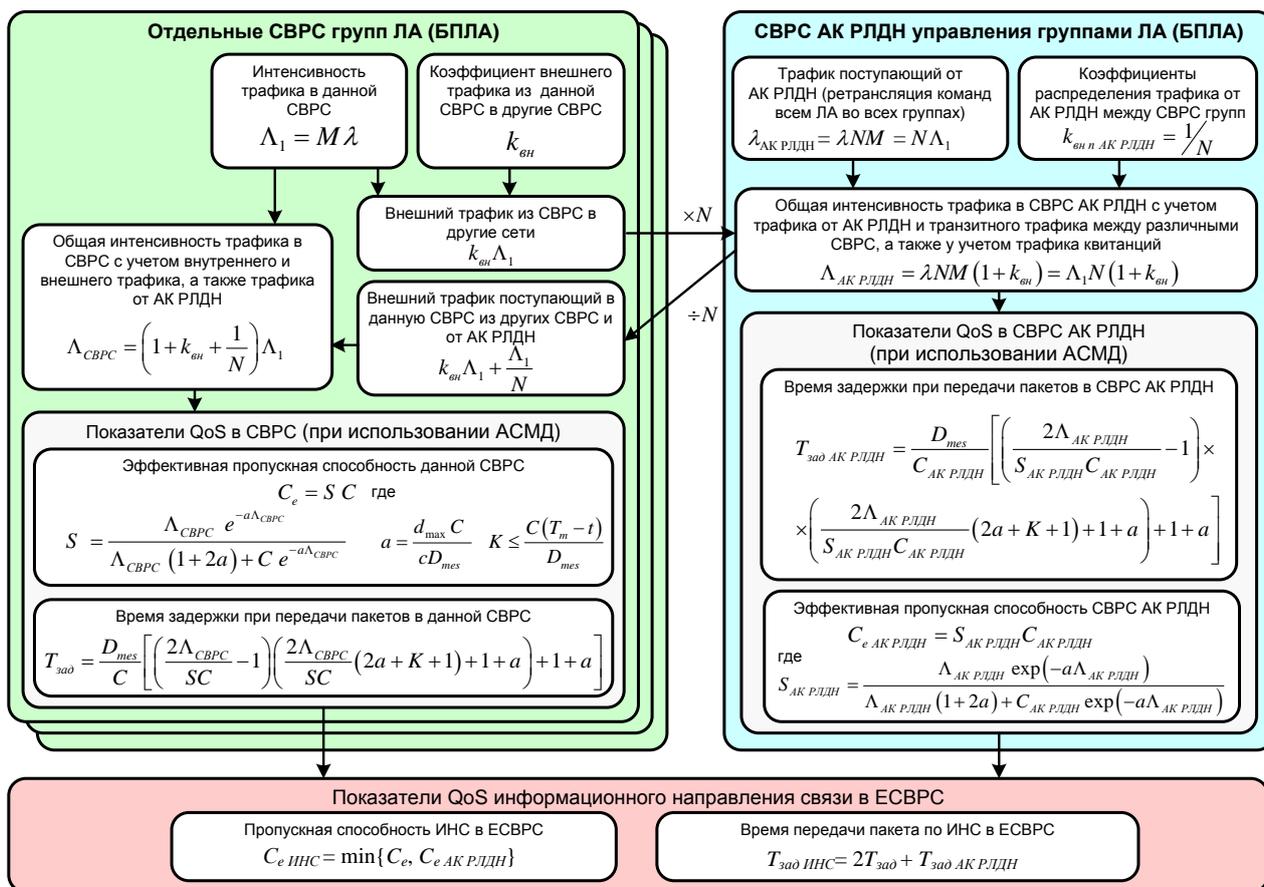


Рис. 5. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ЕСВРС

- интенсивность доминирующего источника ЕСВРС – АК РЛДН равна суммарной интенсивности передачи данных и команд всем управле-

мым ЛА (БПЛА) в соответствии с иерархическим принципом управления  $\lambda_{AK\text{ РЛДН}} = \lambda M N = N \Lambda_1$ .

- е) успешное получение информационных пакетов подтверждается, но доля трафика квитанций в ЕСВРС по отношению к доли информационного трафика ничтожно мала:  $k_{кв} = 0$ .

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ЕСВРС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид представленный на рис. 5.

### Выводы

Предложенная модель ЕСВРС формализует процессы иерархического информационного обмена в сети управления авиацией на ТВД с АК РЛДН. Данная модель позволяет исследовать QoS абонентов (ЛА и БПЛА) в данной сети, а также оценить предельные возможности ЕСВРС по количеству одновременно обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности радиоканалов.

Данная работа продолжает цикл публикаций авторов посвященных вопросам развития сетей связи управления военной авиацией и развивает работы [4-6, 13, 14] по организации авиационной связи на ТВД на основе спутниковых систем связи. К элементам новизны данной модели ЕСВРС, относится то, что данная модель формализует организацию ЕСВРС ТВД с учетом того, что центральным элементом сети является АК РЛДН. При этом же АК РЛДН является доминирующим источником трафика в ЕСВРС. Рассматриваемая ЕСВРС является сложной двухуровневой сетью связи, основу которой на верхнем уровне составляет СВРС АК РЛДН для управления группами ЛА и БПЛА, а нижний уровень сети образован отдельными СВРС для обмена данными внутри групп ЛА (БПЛА).

На основании представленной модели ЕСВРС в дальнейшем предполагается провести моделирование различных вариантов организации связи на ТВД при управлении авиацией с АК РЛДН, с целью обоснованного выбора наиболее рационального варианта и его внедрения в виде математического обеспечения в подсистему связи АК РЛДН.

### Литература

1. 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.

2. Антонов Д. А., Бабич Р. М., Балыко Ю. П., Белоглазов И. Н., Бернинский Е. Я., Борисов Л. В., Виноградов С. М., Войтенко В. И., Герасимов А. А., Гузеев Б. Н., Доценко А. В., Жеребин А. М., Зайцев А. В., Зинич В. С., Инсаров В. В., Кислицын В. А., Кичигин Г. Г., Колпаков К. М.,

Корниенко В. Н., Кравченко В. С., Кульчак М. Г., Махов Е. А., Немыченков И. В., Попов В. А., Пухов А. Л., Селезнев И. С., Сорокин Ю. Н., Топорков Н. В., Федосов Е. А., Червин В. И. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

3. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

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

5. 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. № 1. С. 7-16.

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

7. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиопреимущества. Том 1. Принципы построения систем радиопреимущества. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

8. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиопреимущества. Том 3. Системы командного радиопреимущества. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

9. Смирнов С. В. Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 165-181. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/06-Smirnov.pdf> (дата обращения 14.06.2018).

10. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

11. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

12. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы

управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 16.06.2018).

13. 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 межсетевых обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

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

### References

1. 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).

2. Antonov D. A., Babich R. M., Balyko Iu. P., Beloglazov I. N., Berninskii E. Ia., Borisov L. V., Vinogradov S. M., Voitenko V. I., Gerasimov A. A., Guzeev B. N., Dotsenko A. V., Zherebin A. M., Zaitsev A. V., Zinich V. S., Insarov V. V., Kislitsyn V. A., Kichigin G. G., Kolpakov K. M., Kornienko V. N., Kravchenko V. S., Kul'chak M. G., Makhov E. A., Nemychenkov I. V., Popov V. A., Pukhov A. L., Seleznev I. S., Sorokin Iu. N., Toporkov N. V., Fedosov E. A., Chervin V. I. *Aviatsiia VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Aviation of the Russian air force and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).

3. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funkcionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

4. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 4, pp. 43-51 (in Russian).

5. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united air-space network with decentralized traffic routing based on Mesh technology. *Infocommunikacionnye tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 7-16 (in Russian).

6. 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).

7. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

8. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

9. Smirnov S. V. Analysis of Researches in Field of Aeronautical Telecommunication and Justification of New Ways of Improvement of Radio Network of AWACS. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 1-27. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/01-Smirnov.pdf> (accessed 14 June 2018) (in Russian).

10. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosviasi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

11. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy sviazi* [Radio Communications System]. Voronezh, Military Aviation Engineering University, 2011. 285 p. (in Russian).

12. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 June 2018) (in Russian).

13. 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. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

14. 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. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

**Статья поступила 10 июля 2018 г.**

### **Информация об авторах**

*Смирнов Сергей Владимирович* – 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: web-shark@mail.ru

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Заместитель генерального директора по научной работе. ООО «Корпорация «Интел Групп». Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

*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

*Попов Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент. Начальник кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: методы эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. E-mail: popsa230@rambler.ru

Адрес: Россия, 197372, Санкт-Петербург, Богатырский пр., д. 32, корп. 1, лит. А, офис 6Н.

---

## **Integral Radio Network of Aircrafts Control from AWACS, Based on the Hierarchical Principle of Routing**

S. V. Smirnov, S. I. Makarenko, M. S. Ivanov, S. A. Popov

*Aviation of Aerospace forces Russia is used in remote theatres of combat operations, which are not equipped with stationary control and communication system. For this reason, the airborne warning and control system (AWACS) is used as an air command post to control the aircrafts. However, factors such as high intensity of flights, a large number of aircraft controlled in parallel from AWACS, have identified the need for a more rational use of resources of the integral radio network of AWACS. As one of the most important task in this case have been the organization of routing as commands and information messages in the integrated radio network. The model of the integrated radio network of aircrafts control from AWACS with a hierarchical principle of routing is considered in the paper. The model allows evaluating the effectiveness of different ways of organizing communication in the integrated radio network for informed choice the most rational way. This rational way of routing is to be introduced in software of communications system of AWACS.*

*Keywords: radio network, aviation, relay, routing, communications system, military aircraft, AWACS.*

### **Information about Authors**

*Sergey Vladimirovich Smirnov* – 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: web-shark@mail.ru

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Chief designer. “Intel Group Corporation” ltd. Fields of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

*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

*Sergey Aleksandrovich Popov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Chief 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: methods of operation of avionics. E-mail: popsa230@rambler.ru

Address: Russia, 197372, Saint Petersburg, Bogatyrskiy prospect, 32, korp. 1A, office 6N.