

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
РЕСУРСОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОФИЛАКТИКОЙ  
НА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ**

**К. А. Малыков, О. А. Коновалов, С. Р. Каберов, Г. А. Попов**

*Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)*

**Поступила в редакцию 18.03.2014 г.**

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы моделирования процессов рационального планирования профилактических работ (ПР) на авиационной технике (АТ) с учетом распределения ресурсов. Предложена синтезированная математическая модель организационно-технической системы (ОТС) при выполнении отдельных ПР с применением методов теории планирования эксперимента.

**Ключевые слова:** профилактические работы, математическая модель, организационно-техническая система, распределение ресурсов.

**Annotation.** In work questions of modeling of processes of rational planning of preventive works (PW) on the aircraft equipment (AE) taking into account distribution of resources are considered. The synthesized mathematical model of organizational-technical system (OTS) for an assessment of separate PW on application of methods of the theory of planning of experiment is offered.

**Keywords:** preventive works, mathematical model, organizational and technical system, distribution of resources.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В Одним из путей повышения эффективности сложных технических систем является совершенствование программ технического обслуживания и ремонта радиоэлектронных комплексов воздушных судов (РЭК ВС). Существующая система технической эксплуатации предъявляет высокие требования к организации и проведению ПР на АТ, которые охватывают широкий круг работ технического и организационно характера [1].

Основными требованиями к организации ПР на АТ являются плановость, адаптивность к различным условиям эксплуатации, оценка

состояния, а также возможность контроля, управления и перераспределения ресурсов ОТС. Однако на практике продолжительность ПР при их планировании оценивается экспертными методами, как правило, ориентировочно без использования математического аппарата. В связи с этим существующая организация планирования ПР не в полной мере отвечает перспективным положениям системного подхода и требует научно-методологической обоснованности [2].

Указанные обстоятельства затрудняют обеспечение эффективного выполнения ПР при реализации методов эксплуатации, учитывающих фактическое техническое состояние АТ. При этом необходимо отметить, что каждый метод эксплуатации имеет специфический способ определения сроков и объе-

мов ПР. Этим обуславливается актуальность задачи рационального планирования профилактических мероприятий на АТ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные для построения рационального плана ПР на АТ:  $R_{omc}$  – показатели состояния и распределения ресурсов ОТС;  $S$  – совокупность эксплуатационных свойств АТ;  $\tau_{np}$  – период планирования ПР;  $W_{np}$  – показатель эффективности выполнения ПР на интервале времени  $\tau_{np}$ ;  $Q$  – исходный перечень целевых осмотров и проверок для планирования ПР;  $T_{pd}$  – продолжительность рабочего дня (РД). Результатом планирования является план  $\left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{np}}$ , соответствующий заданному периоду  $\tau_{np}$ , числу единиц АТ на которых в течении  $q_i$  РД должны быть проведены  $Y_t$  ПР.

Задача исследования заключается в том, чтобы определить такой рациональный план ПР  $\left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{npj}}$  на период  $\tau_{npj}$ , эффективность которого  $W_{np} \left( \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{npj}}^* \right)$  будет выше эффективности плана ПР –  $W_{np} \left( \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{np(j-1)}} \right)$ , реализованного ранее. Это может быть достигнуто за счет перераспределения ресурсов ОТС и корректировки исходного перечня ПР при фиксированных показателях продолжительности РД и совокупности эксплуатационных свойств рассматриваемого образца АТ [3]:

$$\begin{aligned} \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{npj}}^* : W_{np} \left( \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{npj}}^* \right) > \\ > W_{np} \left( \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{np(j-1)}} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Построение рационального плана выполнения ПР на определенный период представляет собой задачу, выполняемую в четыре этапа:

1. Анализ исходных данных с целью определения организационных параметров планирования ПР –  $Q$ ,  $T_{pd}$ ,  $\tau_{np}$  и факторного пространства  $\Omega_{R_{omc}}$ .

2. Синтез математической модели ОТС для оценки выполнения каждой отдельной  $t$ -ой

ПР из  $n$ -мерного перечня  $Q$ , при известной совокупности эксплуатационных свойств  $S$ , на факторном пространстве, определяющем области допустимых значений показателей ресурсов ОТС –  $\Omega_{R_{omc}}$ :

$$Y_t = F \left( R_{omc} / Q, S \right), \quad t = \overline{1, N}, \quad (2)$$

при  $R_{omc} \in \Omega_{R_{omc}}$ .

3. Формирование опорного плана  $\left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{np}}$  выполнения ПР на период  $\tau_{np}$ , путем реализации поискового алгоритма определения такого множества  $\{q_1(Y_t), q_2(Y_t), \dots, q_i(Y_t)\}$  наборов  $q$  ПР на каждый РД, частные функции качества  $f_k$  которого удовлетворяют ограничениям  $C_k$ , а общая функция качества  $\varphi$  достигает минимума при выполнении условия:

$$\begin{aligned} \left[ R_{Y_t}^{q_i} \right]_{\tau_{np}} = \{q_1(Y_t), \dots, q_i(Y_t)\}: \\ f_k(q_i(Y_t)) \leq C_k, \quad \forall k = \overline{1, K}; \\ \varphi [f_k(q_i(Y_t))] \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

4. Оценка эффективности выполнения опорного плана с целью определения рационального плана в соответствии с условием (1).

*Определение.* Рациональным будем называть такой опорный план проведения ПР, который является адекватным реальным процессам эксплуатации АТ и удовлетворяет условию возрастания эффективности профилактики на заданных периодах планирования.

При этом необходимо отметить, что возможность рационального планирования ПР определяется полнотой факторного пространства ОТС.

## СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТС

Вследствие отсутствия формализованной модели функционирования объекта исследования, синтез математической модели ОТС при выполнении отдельных ПР предлагается производить с применением методов теории планирования эксперимента и математической статистики [4].

ОТС представим в виде объекта, на вход которого на фоне помех воздействует вектор контролируемых параметров  $X$ , определяю-

щий набор факторов (показателей распределения ресурсов). Выходной характеристикой является вектор  $Y$ , определяющий группу параметров оптимизации, характеризующих продолжительность выполнения ПР. Математическая формализация заключается в получении качественной и количественной информации о влиянии каждого из  $X_n$  факторов. При этом возможно рассчитать значение выходной величины  $Y_i$  при заданном режиме профилактики.

Математическая модель в классе алгебраических полиномов имеет вид:

$$Y = X \cdot B, \quad (4)$$

где  $B$  – вектор неизвестных коэффициентов уравнения регрессии.

$X$  – матрица плана, а  $Y$  – функция отклика.

Строки матрицы плана  $X$  представляют собой комбинации кодированных значений факторов для каждой экспериментальной точки:

$$X = [x_{ij}], \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, S}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество опытов факторного эксперимента;

$S$  – число коэффициентов уравнения регрессии.

В процессе эксперимента объекту ОТС последовательно задаются комбинации входных параметров в соответствии с кодировкой в строке рандомизированной матрицы плана эксперимента  $X$  (5), а на выходе измеряются соответствующие им значения функции отклика  $\tilde{Y}$ . Вектор коэффициентов  $B$  определяется путем решения уравнения (4) в матричной форме:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T \tilde{Y}. \quad (6)$$

Тогда, математическую модель ОТС, в общем виде, с учетом (6), представим в виде алгебраического полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1, \\ j>i}}^k b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (7)$$

Выбор степени полинома и синтез математической модели ОТС производится на основе итерационной процедуры и представлен на рис. 1.

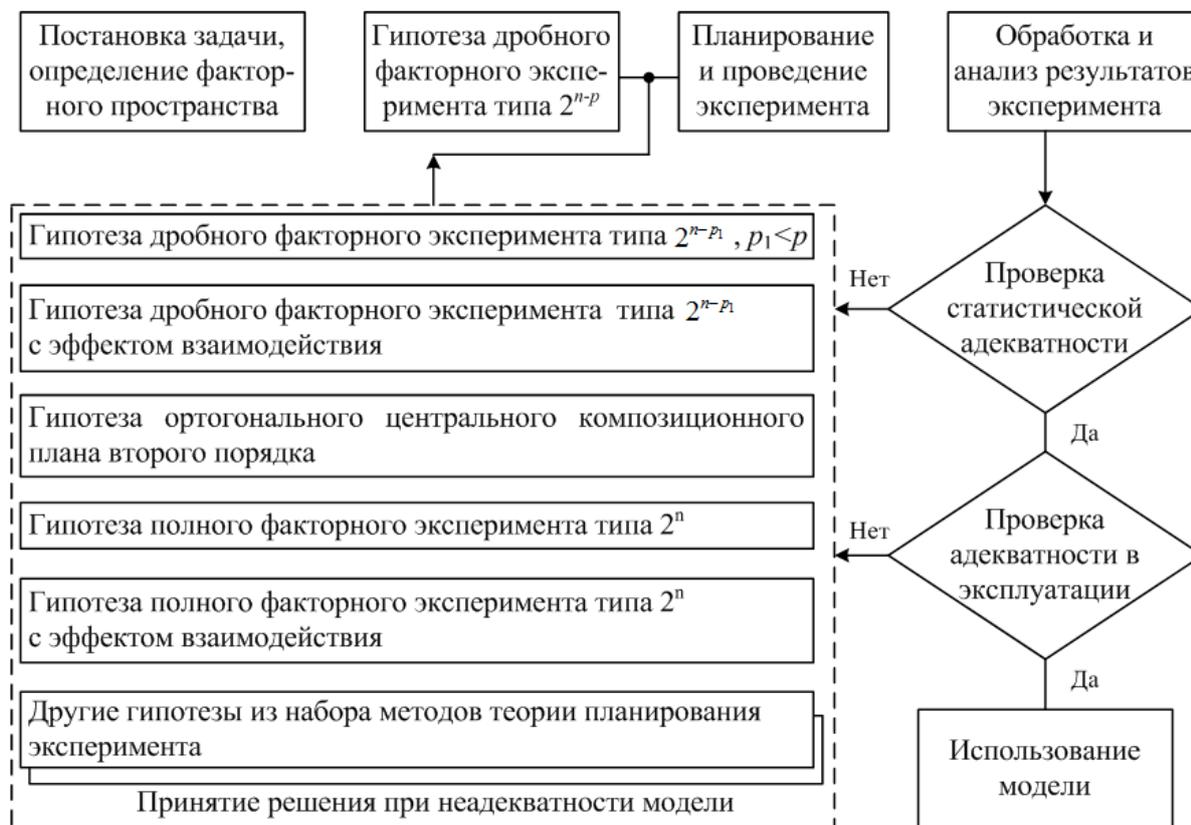


Рис. 1. Алгоритм синтеза математической модели ОТС

Каждая итерация содержит следующие характерные этапы: планирование и проведение активного эксперимента, проверка воспроизводимости опытов с помощью критерия Кохрена, вычисление параметров функции отклика и проверка их значимости по критерию Стьюдента, проверка статистической адекватности модели по критерию Фишера, переход от кодированных переменных к натуральным, проверка адекватности математической модели данным из опыта эксплуатации РЭК ВС.

### МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПР В ОТС

Предлагаемая методика планирования ПР представлена на рис. 2.

Основную функцию в разработанной методике выполняет математическая модель ОТС ( $Y_i$ ), синтезируемая методами теории планирования эксперимента с использованием выбранной гипотезы  $G$  и данных процесса эксплуатации:  $Q$  – перечня ПР,  $X_n$  – показателей распределения ресурсов ОТС,  $\tilde{Y}_i$  – измеренной продолжительности выполнения отдельных ПР. Проверка статистической адекватности модели проводится по критерию Фишера  $F_{кр}$ . На основании этой модели с помощью алгоритма поисковой оптимизации, построенного с применением метода штрафных функций (критерий оптимизации  $F_{штр}$ ), формируется опорный план ПР  $[R_{Y_i}^{q_i}]$ . Здесь  $r$  – число РЭК ВС, на которых проводятся  $Y_i$  ПР из набора  $q$   $i$ -го РД. План должен быть оптимальным относительно имеющейся априорной информации о состоянии

РЭК ВС, условий эксплуатации и показателей распределения ресурсов ОТС. Далее осуществляется оценка эффективности ПР. После коррекции формируется и реализуется новый опорный план проведения ПР. Планирование ПР по предложенной методике осуществляется на протяжении жизненного цикла образца РЭК ВС [2].

Для построения опорного плана выполнения ПР предлагается применить метод поисковой оптимизации с использованием функций штрафа [3]. Сущность метода заключается в построении такой функции качества  $\varphi(q_i)$ , минимум которой представляет собой решение поставленной задачи (3):

$$U(\hat{q}_i) = \min(\varphi(q_i)) = \min\left(U(q_i) + \lim_{i \rightarrow \infty} F_{штр}(q_i)\right), \quad q_i \in \Omega_q, \quad (8)$$

где  $U(\hat{q}_i)$  – функция оптимального распределения ПР по РД;  $U(q_i)$  – функция распределения ПР по РД;  $q_i$  – набор ПР на  $i$ -ый РД;  $\hat{q}_i$  – оптимальный набор ПР на  $i$ -ый РД.

Учитывая, что операции определения минимума и предела всего значения функций при этом перестановочные, последовательность обычных задач безусловной оптимизации имеет вид:

$$\min(U(q_i) + F_{штр}(q_i)), \quad q_i \in \Omega_q. \quad (9)$$

Пределом решений является минимум функции  $\varphi(\hat{q}_i)$  на множестве  $\Omega_q$ .

Синтез алгоритма оптимизации математической модели ОТС для планирования ПР реализован путем минимизации функции штрафа:

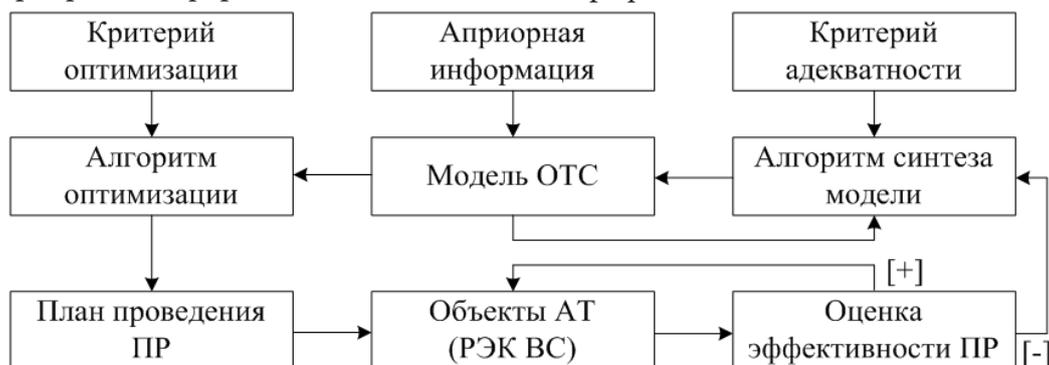


Рис. 2. Методика планирования ПР

$$F_{штр}(q_i) = \sum_{j=1}^3 f_{штрj}(q_i). \quad (10)$$

Частные функции штрафа  $f_{штрj}(q_i)$  имеют вид:

$$f_{штрj}(q_i) = \begin{cases} f_{штр1}(q_i) = |t_{рд} - Y_{q_i}|; \\ f_{штр2}(q_i) = R(\tau) - r_i(\tau); \\ f_{штр3}(q_i) = 1, \text{ при } m_{q_i}^\phi = 0, m_{q_i}^\phi \in \Omega_q; \\ f_{штр3}(q_i) = 0, \text{ при } m_{q_i}^\phi \neq 0, m_{q_i}^\phi \in \Omega_q; \end{cases} \quad (11)$$

где  $t_{рд}$  – продолжительность РД;  $Y_{q_i}$  – расчетное время на выполнение  $q_i$  набора ПР в  $i$ -ый РД, с учетом показателей распределения ресурсов ОТС;  $R(\tau)$  – количество РЭК ВС, подлежащих ПР с периодичностью  $\tau$ ;  $r_i(\tau)$  – количество РЭК ВС на которых ПР выполнены в  $i$ -ый РД с заданной периодичностью  $\tau$ ;  $m_{q_i}^\phi$  – количество ПР из набора  $q_i$ , запланированных на  $i$ -ый РД, которые предусматривают проверку функционирования РЭК ВС или отдельных ее подсистем.

Частные функции штрафа позволяют учитывать:  $f_{штр1}$  – равномерность распределения ПР по времени их выполнения,  $f_{штр2}$  – установленную периодичность ПР и  $f_{штр3}$  – равномерность планирования выполнения ПР.

Оптимальный набор  $q_i$  ПР на  $i$ -ый РД определяется путем поэтапного перебора всех возможных комбинаций  $q_i$  для  $t=1, L$  ПР в пределах области определения  $\Omega_q$  с вычислением на каждом этапе значения  $F_{штр}(q_i)$ . Набор  $q_i$ , имеющий минимальное значение  $F_{штр}(q_i)$ , будет являться искомым  $\hat{q}_i$ .

Опорный план проведения ПР на заданный период  $\tau_{np}$  представим как:

$$\left[ R_{Y_i}^{q_i} \right]_{\tau_{np}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \dots & r_{i1} \\ r_{12} & r_{22} & \dots & r_{i2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{1t} & r_{2t} & \dots & r_{it} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Отличительная особенность и практическая значимость разработанного алгоритма

заключается в том, что путем поочередного задания математического ожидания значения  $t_{рд}$  в заданных пределах, выявляется резерв времени, необходимый для введения дополнительных ПР.

### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПР

В качестве примера рассмотрим синтез математической модели ОТС при выполнении ПР, проводимых на РЭК ВС. Средством синтеза служит комплексное применение гипотез дробного факторного эксперимента, с эффектом взаимодействия факторов и ортогонального центрального композиционного планирования второго порядка.

Примем в качестве цели моделирования выбор таких режимов выполнения ПР на РЭК ВС, при которых обеспечивается максимальное количество обслуженных систем при минимальных затратах времени. В качестве параметров оптимизации принимаем показатели продолжительности выполнения шести ПР  $Y_t$ ,  $t=1,6$ , определенных «Перечнем целевых осмотров (ЦО) и проверок». Области определения этих факторов получены в результате анализа опыта эксплуатации РЭК ВС в рассматриваемой ОТС.

Анализ временных затрат на ПР показал, что вследствие нерационального использования ресурсов ОТС для 52 % планов время на выполнение ПР превышает время РД.

Для построения рационального плана выполнения ПР применен метод поисковой оптимизации с использованием функций штрафа (8)–(12).

Сравнение значений расчетного времени спланированных перечней ПР (рис. 3) показывает, что при существующем планировании  $Y_1(q)$  имеет бессистемный характер, отражающий неравномерность загрузки персонала в РД. Построенные планы выравнивают затраты времени при максимальном ( $Y_2(q)$ ) и равномерном ( $Y_3(q)$ ) распределении в каждый РД. Сопоставление значений функций штрафа для каждого РД (рис. 4), при существующем планировании  $F_{штр1}(q)$  и

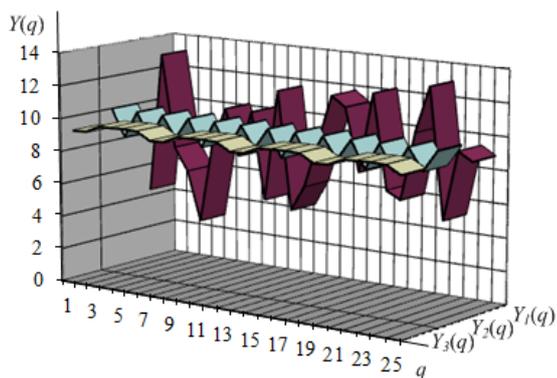


Рис. 3. Сравнение значений расчетного времени ПР

при планировании с применением разработанного алгоритма  $F_{штр2}(q)$  и  $F_{штр3}(q)$ , отражает эффект минимизации целевой функции по критериям (11). Результаты оптимизации показывают, что апробируемые алгоритмы поиска рационального плана ПР позволяют снизить в 4 раза суммарные значения минимизированных штрафных функций  $SF_{штр2}(q)$  и  $SF_{штр3}(q)$  по сравнению с  $SF_{штр1}(q)$ .

Апробирован рациональный план проведения шести ПР на трех месячный период, отличительной особенностью которого является перераспределение количества РЭК ВС, на которых должны выполняться ПР в каждый РД. В результате эффективность выполнения ПР увеличилась на 12 % по сравнению с предыдущим периодом планирования ПР. Синтезированная математическая модель ОТС при выполнении ПР адекватна результатам реального процесса эксплуатации РЭК ВС.

На втором этапе существующий перечень ЦО и проверок был скорректирован путем выбора ПР, направленных на: повышение безопасности полетов; улучшение эксплуатационных характеристик РЭК ВС; реализацию возможности комплексирования ПР по месту их проведения, объему и технологии выполнения; охват основных навигационных режимов РЭК ВС. В результате применения разработанных алгоритмов получен рациональный план проведения 8 ПР на период шесть месяцев. В результате эффективность выполнения ПР увеличилась на 9 % по сравнению с первым этапом апробации.

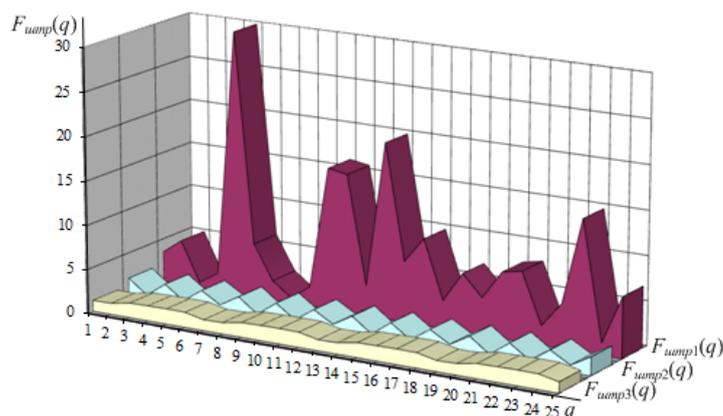


Рис. 4. Сопоставление значений функций штрафа для каждого РД

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы и синтезированные математические модели могут быть использованы для планирования: ПР в ОТС; отдельных перечней ЦО и проверок; ПР при эксплуатации РЭК ВС по состоянию на длительные периоды; автоматизации управления функционированием ОТС при рациональном планировании ПР на АТ. Необходимо отметить, что математические модели ОТС при выполнении ПР и алгоритм поиска рационального плана ПР могут использоваться как самостоятельно, так и в составе более общих алгоритмов и моделей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зырянов Ю.Т. Управление профилактикой в организационно-технических системах: монография / Ю.Т. Зырянов, К.А. Малыков. – М. : АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2005. – 160 с.
2. Зырянов Ю.Т. Управление точностными характеристиками в организационно-технических системах при ограниченных ресурсах / Ю.Т. Зырянов, О.А. Коновалов, Д.Н. Ледовских, К.А. Малыков, В.В. Морозов, А.Л. Сухов // Вестник Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института). – 2007. – №2. – С. 63–83.
3. Konovalov O.A. Rational planning of technical operation of means of communication / O.A. Konovalov, K.A. Malykov, S.R. Kabarov //

Materiály VIII mezinárodní vědecko - praktická konference «Zprávy vědecké ideje - 2012». – Díl 21. Matematika. Fyzika. Moderní informační technologie. – Vystavba a architektura: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2012. – Str. 16–18.

**Малыков Константин Анатольевич** – заместитель начальника кафедры Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), к.т.н., доцент.  
Тел.: 8-910-758-13-10.  
E-mail: mka310565@mail.ru

**Коновалов Олег Анатольевич** – преподаватель Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), к.т.н.  
Тел.: 8-908-132-70-68.  
E-mail: Oleg-070707@yandex.ru

**Каберов Сергей Рудольфович** – доцент Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), к.т.н., доцент.  
Тел.: 8-980-547-71-57.  
E-mail: Sanek11.91@inbox.ru

**Попов Геннадий Александрович** – ст. преподаватель Военного учебно-научного центра ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), к.т.н.  
Тел.: 8-908-132-70-68.

4. *Джонсон Н., Лион Ф.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион / Пер. с англ. – М. : Мир, 1981. – 520 с.

**Malykov Konstantin** – deputy head of department of the Air Force Military Educational Scientific Center «Military and Air Academy of a Name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh), candidate of technical sciences, assistant professor.  
Phone: 8-910-758-13-10.  
E-mail: mka310565@mail.ru

**Konovalev Oleg** – teacher of the Air Force Military Educational Scientific Center «Military and Air Academy of a Name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh), candidate of technical sciences.  
Phone: 8-908-132-70-68.  
E-mail: Oleg-070707@yandex.ru

**Kaberoev Sergey Rudolfovich** – assistant professor of the Air Force Military Educational Scientific Center «Military and Air Academy of a Name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh), candidate of technical sciences, assistant professor.  
Тел.: 8-980-547-71-57.  
E-mail: Sanek11.91@inbox.ru

**Popov Gennady Aleksandrovich** – senior teacher of the Air Force Military Educational Scientific Center «Military and Air Academy of a Name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh), candidate of technical sciences.  
Phone: 8-980-348-33-16.