УДК 004.942 DOI: 10.17587/mau.21.375-382

**Ю. И. Буряк,** д-р техн. наук, buryak@gosniias.ru, **А. А. Скрынников,** канд. техн. наук, a1260@mail.ru,
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Москва

# Алгоритм рационального планирования и распределения ресурсов при подготовке группы летательных аппаратов к применению в условиях неопределенности[1]

*Предложено решение задачи распределения инженерно-технического состава при подготовке группы летательных аппаратов (ЛА) к применению, когда длительность выполнения работ — величина случайная. При решении задачи в качестве показателя эффективности для выбора варианта планирования работ рассматривается гарантированное (т.е. с заданной наперед надежностью) время выполнения всех работ на группе ЛА. Сформирована постановка задачи и разработан алгоритм рационального планирования и распределения ресурсов при подготовке группы ЛА к применению в условиях неопределенности. Рассмотрены частные случаи: выполнение последовательных работ на одном ЛА; выполнение последовательных работ на ЛА при ожидании специалиста (заданное и случайное время освобождения специалиста); выполнение последовательности работ на двух ЛА. Полученные частные результаты позволяют построить модель выполнения последовательности работ и получить закон распределения суммарного времени выполнения работ и, как следствие, рассчитать гарантированное время выполнения всех работ на группе ЛА.*

***Ключевые слова**: группа летательных аппаратов, техническое обслуживание, алгоритм расчета состава бригады специалистов, реальное время, вероятность*

## Введение

Одной из задач планирования технического обслуживания авиационной техники (АТ) является распределение инженерно-технического состава. В случае жестких ограничений по времени подготовки группы ЛА возникает задача обоснования требуемого количественного состава специалистов разного профиля.

В работах [1, 2] приведены алгоритм рационального планирования работ, выполняемых несколькими специалистами разного профиля на группе однотипных ЛА в детерминированной постановке, т.е. при фиксированной длительности выполнения каждой из работ, а также автоматизированная технология контроля их деятельности в реальном времени.

Рациональное планирование основано на том, что последовательность выполняемых на каждом ЛА работ строится по принципу приоритета работ, имеющих максимальную длительность, с учетом того, что соответствующий специалист в этот момент времени свободен (не занят на другом ЛА). При этом получаемый рациональный план не намного хуже потенциально возможного оптимального решения, получение которого связано с необходимостью рассмотрения огромного числа возможных вариантов.

Ограничением при планировании является невозможность одновременного выполнения двух и более работ на одном ЛА и невозможность одновременной работы специалиста на двух и более ЛА.

В реальности время выполнения каждой из работ отличается от нормативного, что обусловлено влиянием большого числа случайных факторов (например, возможные неисправности и отказы, обнаруженные в полете и при проведении работ). В этом случае возникает необходимость оценки разработанного плана работ, т.е. оценки длительности выполнения работ на группе ЛА, а именно: оценки вероятности выполнения всех работ к заданному моменту времени или оценки потребного времени для подготовки группы ЛА к полету с заданной гарантированной вероятностью. При этом время выполнения всех работ на каждом ЛА определяется не только случайной длительностью выполнения каждой из работ, но и случайным (в общем случае) моментом начала каждой из работ, обусловленным моментом времени освобождения соответствующего специалиста.

Данная задача не является новой, имеется ряд методов, позволяющих при определенных условиях получить ее решение. Среди них, прежде

[1]Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № № 18-08-00488а.

всего, следует выделить методы анализа сетевых моделей со случайными параметрами [4—7].

В работе [4] рассмотрены математические модели систем сетевого планирования и управления, характеристики которых содержат случайные параметры, рассмотрены аналитические и стохастические методы расчета параметров сетевой модели. Логическим продолжением работ автора [4] является монография [5], в которой описаны модели стохастического сетевого планирования на различных стадиях осуществления крупномасштабных разработок. Практическое применение методов стохастического моделирования в интересах оценки плана выполнения комплекса работ рассмотрено в статье [6]. В работе [7] представлены календарное планирование и упорядочивание работ с учетом стохастической неопределенности, прежде всего в части значения времени завершения работ. Планирование производственных систем, функционирующих в условиях неопределенности, рассмотрено в работах [8—10].

Аналогичный подход можно использовать для решения задачи планирования работ на группе ЛА.

Специфической особенностью подготовки группы ЛА к применению является наличие следующих неопределенностей: времени завершения работ и времени освобождения соответствующего специалиста для начала очередной работы. Применение метода стохастического моделирования позволяет учесть указанные особенности рассматриваемой задачи и оценить гарантированное (т.е. с заданной надежностью) время завершения всех работ по плану, разработанному на основе алгоритма рационального планирования.

## Постановка задачи

Рассмотрим группу, состоящую из $n$ ЛА, на каждом из которых необходимо выполнить $m$ работ, длительность которых — случайные величины с известным законом распределения. Работы выполняются бригадой, численность которой характеризуется вектором $K = \{k_1, k_2, ..., k_m\}$, где $k_l$ — число специалистов, выполняющих $l$-ю работу на разных ЛА независимо друг от друга, $l = \overline{1, m}$.

Задан календарный план $G$, полученный с использованием алгоритма рационального планирования [1] при фиксированных (неслучайных) длительностях выполнения работ. Календарный план $G$ задается ориентированным графом $G = (Z, E)$, где $Z$ — множество вершин (узлов); $E$ — множество ребер. Каждое ребро определяет работу и задается исходящей и входящей вершинами; например работа $i - j$ — ребро графа, соединяющее вершины $i$ и $j$, где вершина $i$ соответствует началу, а вершина $j$ — окончанию работы. Длительность $T_{i-j}$ выполнения работы $i - j$ — величина случайная, задается законом распределения с точностью до параметров. Поэтому время задержки $del_i$ начала работы $i - j$ также случайно, но оно определяется реализуемыми значениями длительности предшествующих работ календарного плана. Множество вершин $z_i$, соответствующих событиям, происходящим при выполнении работ на $r$-м ЛА, обозначим $Z_r$, $Z_r \subset Z$.

Будем считать, что время $T$ выполнения календарного плана подготовки группы ЛА к применению определяется временем подготовки того ЛА, на котором суммарное время выполнения всех работ (с учетом задержек привлекаемых специалистов) будет наибольшим.

Таким образом, $T = \max\limits_{r}\left(\sum\limits_{i,j \in Z_r} T_{i-j} + \sum\limits_{i \in Z_r} del_i\right)$.

Задача по проверке выполнения календарного плана подготовки группы ЛА к полету ставится следующим образом:

- необходимо найти вероятность выполнения в течение заданного времени $t_{зад}$ всех работ по подготовке группы ЛА к полету, т.е. найти значение вероятности $P(T < t_{зад}) = F(t_{зад})$, где $F(t)$ — функция распределения случайной величины $T$;
- необходимо оценить время, необходимое для выполнения всех работ по подготовке группы ЛА к полету с заданной гарантированной вероятностью $P_{зад}$, т.е. найти значение времени $T^* = \arg(F(T^*) = P_{зад})$, где $P_{зад}$ — близкое к единице значение вероятности, заданное наперед.

Таким образом, необходимо проведение вероятностного анализа последовательности событий, определяющих ход выполнения работ.

## Стохастическое моделирование последовательности выполнения работ на группе ЛА

Календарный план работ при их случайной длительности не полностью отражает взаимосвязь проводимых работ. Так, начало выполне-

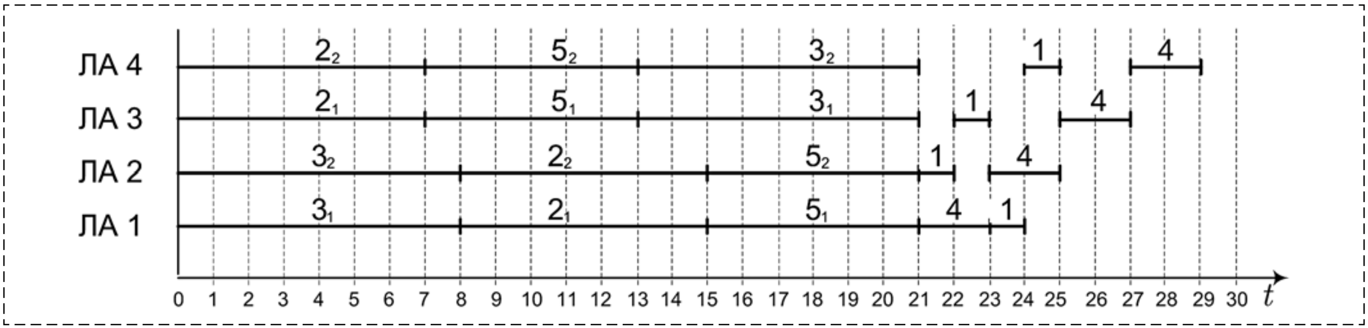


**Рис. 1. Календарный план работ**
**Fig. 1. Job schedule**

ния очередной работы на ЛА определяется не только случайной длительностью выполнения предшествующих работ, но и случайным моментом времени освобождения специалиста, выполняющего работу.

Для проведения вероятностного анализа последовательности событий, определяющих ход выполнения работ, целесообразно построить граф выполнения работ.

Рассмотрим в качестве примера подготовку четырех ЛА бригадой $K\{1, 2, 2, 1, 2\}$. На рис. 1 приведен рациональный календарный план, рассчитанный при фиксированных длительностях выполнения работ; длительность каждой работы принималась равной ее математическому ожиданию. Номера на календарном плане обозначают номера работ с индексом, соответствующим номеру специалиста.

На рис. 2 приведен соответствующий граф выполнения работ. Работы обозначены номерами, и для каждой работы определены события начала и окончания работы. Требование того, что работа не может быть начата, пока не освободится соответствующий специалист, реализуется заданием фиктивных работ (фиктивные работы на графе обозначены штриховыми линиями). Событие считается свершившимся, когда предшествующие ему работы завершены; например, событие 3 завершено, когда окончена предшествующая работа 0-3 на ЛА 2 (освободился ЛА 2) и окончена работа 0-1 на ЛА 4 (освободился специалист $2_2$), в этот момент может быть начата работа 3-7, выполняемая специалистом $2_2$ на ЛА 2.

Построенный для фиксированных длительностей выполнения работ граф теперь может быть использован для вероятностного анализа последовательности событий, определяющих ход выполнения работ. Ввиду случайной длительности работ критический путь при различных реализациях будет различным. В связи с этим необходимо определить последовательно для каждого события закон распределения его наступления.

Обозначим: $T^{\text{н}}_{i-j}, T^{\text{к}}_{i-j}$ — случайные моменты начала и окончания работы $i - j$; $T_k$ — случайный момент наступления события $k$. Момент наступления события $k$ определяется из условия $\max\{T^k_{i-k}\}$ для всех $i$, для которых существуют работы $i - k$.

Для двух независимых случайных величин $X_1$ и $X_2$ закон распределения их максимума $Y = \max\{X_1, X_2\}$определяется формулами [3]

$$G(y) = F_1(y)F_2(y);$$
$$g(y) = f_1(y)F_2(y) + f_2(y)F_1(y),$$

где $f_1(\cdot)$, $F_1(\cdot)$ — плотность и функция распределения случайной величины $X_1$; $f_2(\cdot)$, $F_2(\cdot)$ — плотность и функция распределения величины $X_2$.

Закон распределения максимума случайных величин не совпадает с распределением исходных величин. Поэтому решение задачи по оценке суммарного времени выполнения работ на основе

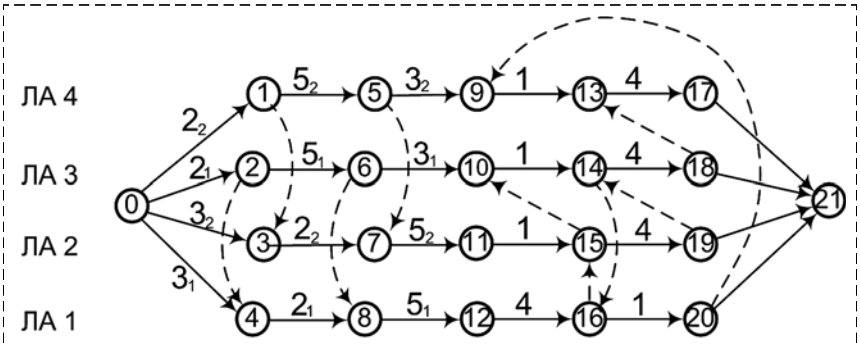


**Рис. 2. Граф выполнения работ**
**Fig. 2. Graph of performance of works**

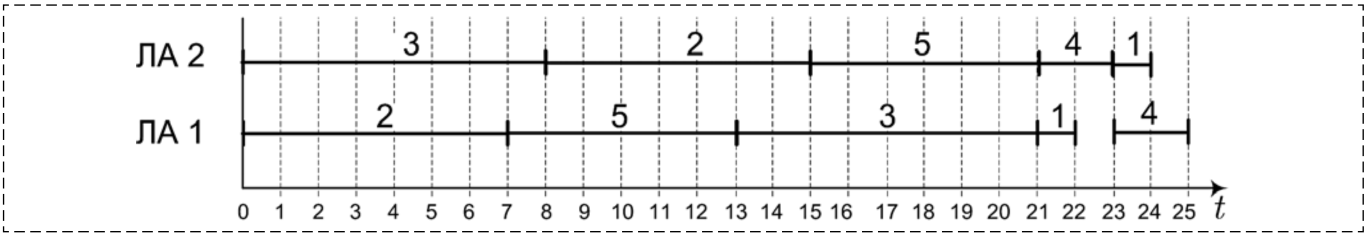


**Рис. 3. Календарный план работ**
**Fig. 3. Job schedule**

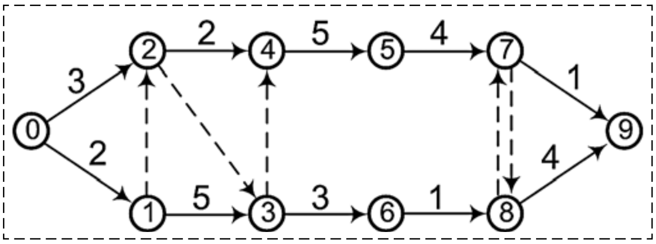

**Рис. 4. Граф выполнения работ**
**Fig. 4. Graph of performance of works**

математического аппарата нахождения закона распределения случайных величин $T^{\text{н}}_{i-j}$, $T^{\text{к}}_{i-j}$, $T_k$ как функций случайных аргументов связано с громоздкими выкладками даже при достаточно простом графе работ.

В таких условиях целесообразным является использование аппарата стохастического моделирования выполнения работ в соответствии с графом.

Стохастическое моделирование работ заключается в реализации с помощью компьютера последовательности выполняемых работ в целях оценивания изучаемых интегральных характеристик. Длительность каждой работы моделируется заданным законом распределения с известными параметрами [11].

В качестве наглядного примера для моделирования рассмотрим календарный график выполнения пяти работ на двух ЛА, когда состав бригады задан вектором $K\{1, 1, 1, 1, 1\}$ (рис. 3, 4, штриховыми линиями на графе обозначены фиктивные работы).

Результаты стохастического моделирования времени завершения работ, выполняемых в соответствии с графом при нормальном законе распределения времени выполнения каждой из работ, приведены на рис. 5, 6. Расчеты проводили при следующих параметрах нормального закона распределения: $m_1 = 1$; $m_2 = 7$; $m_3 = 8$; $m_4 = 2$; $m_5 = 6$ ед., $\sigma_i = 0{,}15m_i$ ед., $i = \overline{1, 5}$, где $m_i$ и $\sigma_i$ — математическое ожидание и среднее квадратическое

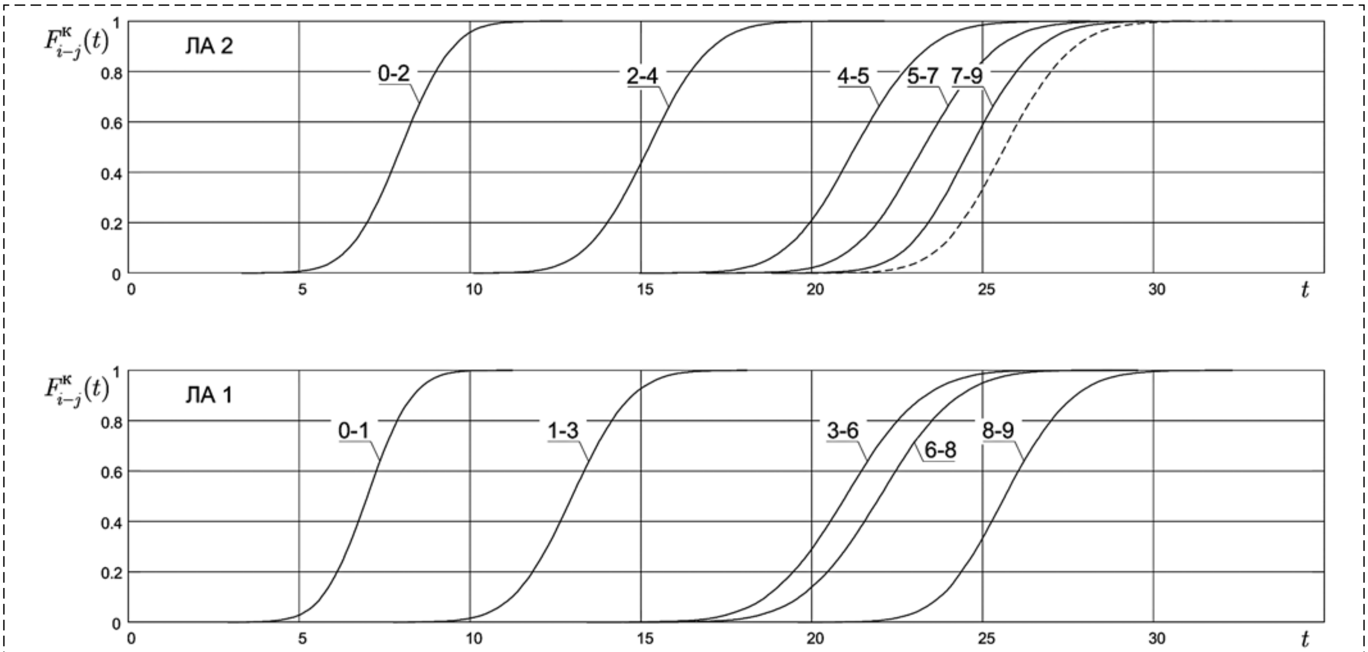


**Рис. 5. Функции распределения времени завершения работ**
**Fig. 5. The distribution function of completion time of work**

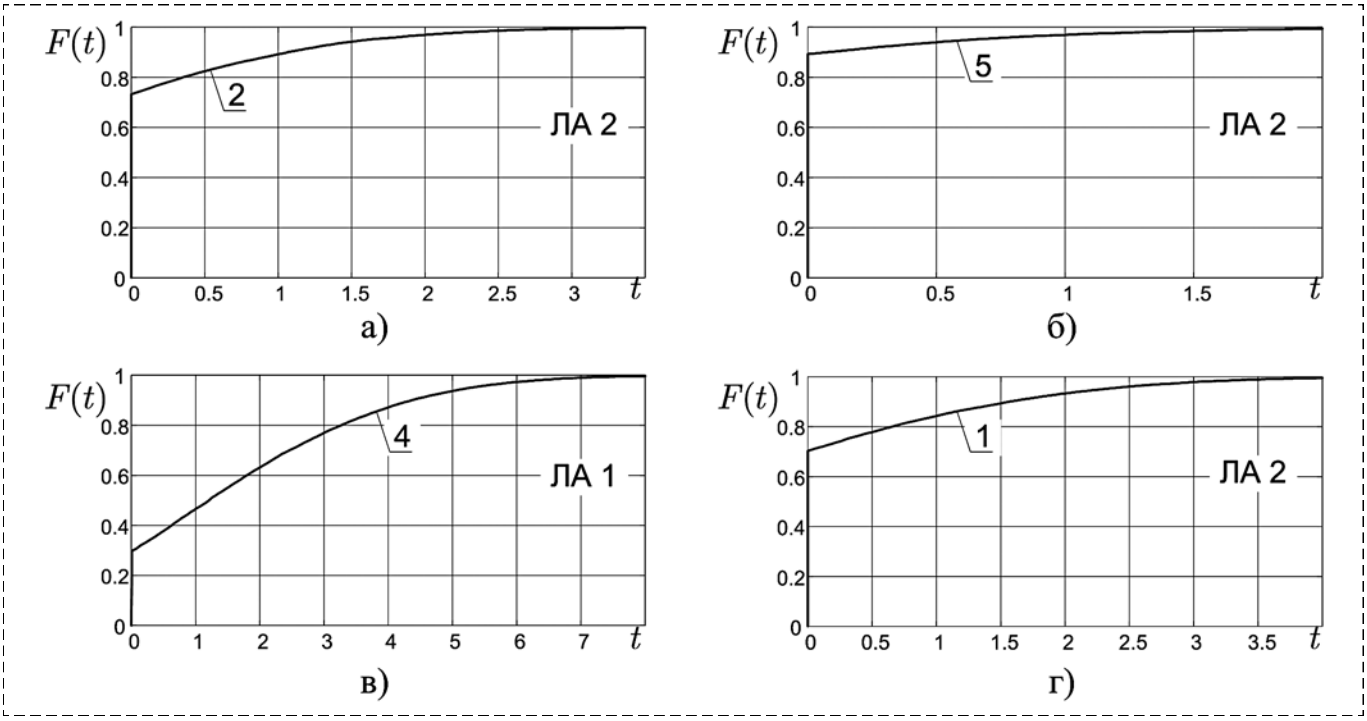


**Рис. 6. Функции распределения времени задержки начала работ:**
*а* — работа 2 на ЛА 2; *б* — работа 5 на ЛА 2; *в* — работа 4 на ЛА 1; *г* — работа 1 на ЛА 2

**Fig. 6. The distribution function of the time delay starting work:**
*a* — work 2 on the aircraft 2; *б* — work 5 on aircraft 2; в — work 4 on aircraft 1; *г* — work 1 on aircraft 2

отклонение времени выполнения $i$-й работы соответственно.

На рис. 5 приведены функции распределения $F_{i-j}^{\text{к}}(t)$ времени завершения каждой из работ, выполняемых на ЛА 1 и ЛА 2. Общее время подготовки группы ЛА для рассматриваемого примера определяется моментом окончания работы 8—9 на ЛА 1. Зная функцию распределения $F_{8-9}^{\text{к}}(t)$ можно определить вероятность готовности группы ЛА к заданному моменту времени и наоборот — определить требуемое время, к которому с заданной вероятностью (надежностью) работы на группе ЛА будут завершены. Так, время, в течение которого группа будет готова с вероятностью 0,90, равно 27,7 ед., с вероятностью 0,95—28,3 ед.

На рис. 6 приведены функции распределения времени задержки начала работ, обусловленной ожиданием специалиста. Задержка определяется как разность между моментом времени окончания предыдущей работы на ЛА и началом следующей; например, $T_{2-4}^{\text{н}} - T_{0-2}^{\text{к}}$ — задержка при завершении события 2.

Как видно из результатов моделирования, время задержки — смешанная случайная величина [12, 13]. Так, задержка начала выполнения работы 2 на ЛА 2 (рис. 6, *а*) — смешанная случайная величина: с вероятностью 0,731 она принимает дискретное значение 0, а с вероятностью 0,269 — множество значений больше нуля.

Полученные законы распределения $F_{i-j}^{\text{к}}(t)$ времени завершения каждой из работ, выполняемых на ЛА 1 и ЛА 2, дают возможность определить числовые характеристики числа завершенных работ на ЛА к текущему времени $t$.

К моменту времени $t$ работа $i - j$ может быть завершена или нет. Вероятность ее завершения к моменту времени $t$ равна значению функции распределения $F_{i-j}^{\text{к}}(t)$. Введем случайную величину $R_{i-j}(t)$ — индикатор окончания работы $i - j$. Эта случайная величина имеет распределение Бернулли [14, 15].

Если (как в рассматриваемом примере) все работы на одном ЛА выполняются последовательно, то вероятность завершения работы $i - j$ равна вероятности завершения всех предшествующих работ и собственно работы $i - j$. Найдем числовые характеристики случайной величины $R_\Sigma(t)$ — число завершенных работ на ЛА к моменту времени $t$.

Пусть работа $i - j$ является $k$-й в последовательности работ, выполняемых на ЛА. Тогда вероятность того, что на ЛА выполнено ровно $k$ работ, равна

$$W_k(t) = P(R_\Sigma(t) = k) = F_{i-j}^{\text{к}}(t),$$

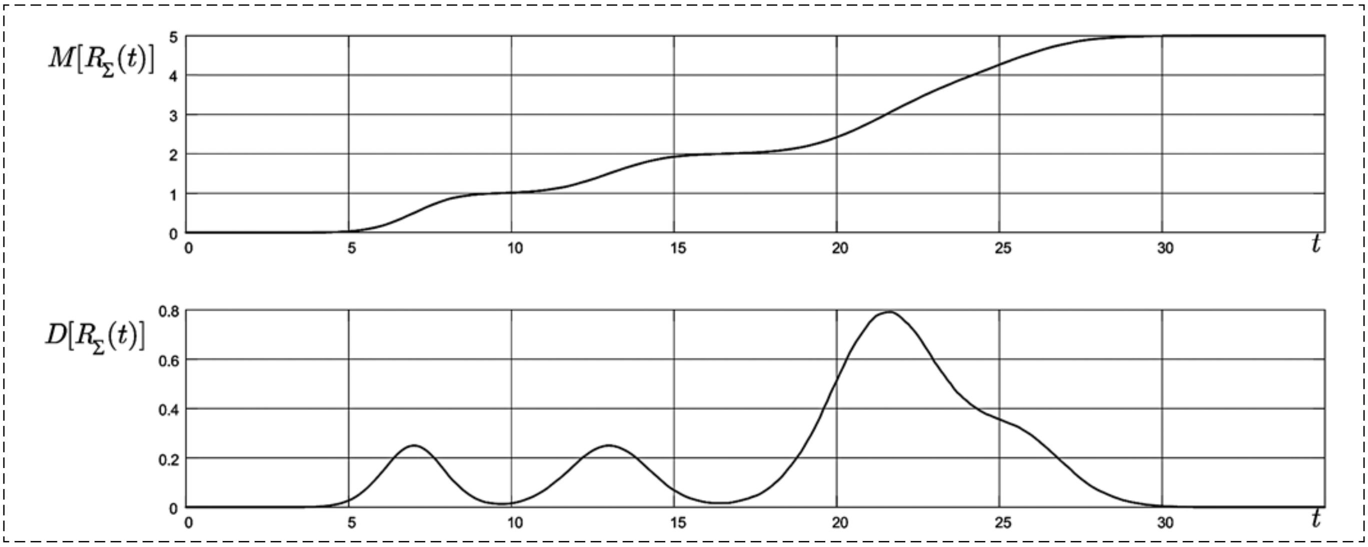


**Рис. 7. Зависимость от времени математического ожидания и дисперсии числа завершенных работ**
**Fig. 7. Dependence of mathematical expectation and variance of the number of completed works on time**

а вероятность того, что завершено меньше, чем $k$ работ, равна

$$P(R_\Sigma(t) < k) = 1 - F^{\text{к}}_{i-j}(t).$$

Математическое ожидание и дисперсию можно вычислить по формулам:

$$M[R_\Sigma(t)] = \sum_{k=0}^{n} k[W_k(t) - W_{k+1}(t)];$$

$$D[R_\Sigma(t)] = \sum_{k=0}^{n} (k - M[R_\Sigma(t)])^2[W_k(t) - W_{k+1}(t)],$$

где $W_{n+1}(t) \equiv 0,\ W_0(t) = P(R_\Sigma(t) < 1)$.

На рис. 7 приведены результаты расчетов числовых характеристик числа завершенных работ на ЛА 1 в зависимости от времени $t$.

## Обоснование рационального состава бригады специалистов

Использование приведенного подхода дает возможность проверить обоснованность рационального состава бригады специалистов, выполняющих работы на группе ЛА, при наличии ограничений на время подготовки с учетом разброса времени выполнения каждой из работ.

На рис. 8 приведена блок-схема алгоритма обоснования состава бригады минимальной численности, которая может обеспечить с заданной надежностью $P_{\text{зад}}$ подготовку группы ЛА в течение заданного времени $t_{\text{зад}}$ при случайной длительности выполнения работ.

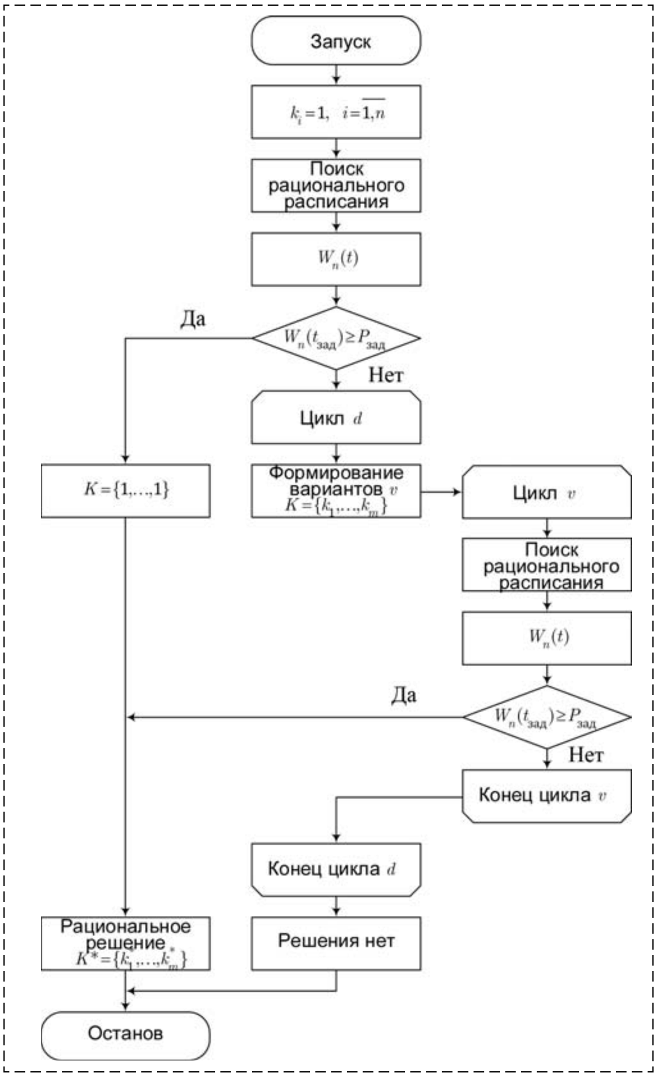


**Рис. 8. Блок-схема алгоритма для обоснования состава бригады минимальной численности**
**Fig. 8. Block diagram of the algorithm of substantiation of the team of specialists of the minimum number**

Так, если бригада минимально возможной численности $K\{1, ..., 1\}$сможет обеспечить выполнение работ с заданной надежностью в течение заданного времени, то увеличение числа специалистов не требуется.

В противном случае формируется множество вариантов состава бригады при увеличении ее численности на $d$ специалистов (цикл по $d = \overline{1, n-1}$). Общее число $v$ возможных вариантов равно $v = m^d$. Для каждого из этих вариантов (цикл по $v$) осуществляется поиск рационального расписания, и если для него выполняется требование $W_n(t_{зад}) \geqslant P_{зад}$, то на этом цикл прекращается и полученное решение является искомым.

## Заключение

Разработанный алгоритм предназначен для анализа вариантов планирования последовательности работ на группе ЛА бригадой специалистов разного профиля с учетом случайной длительности выполнения каждой работы. Ограничения на возможность одновременного выполнения двух и более работ на одном ЛА и одновременной работы специалиста на двух и более ЛА учитываются при составлении графа работ. Стохастическое моделирование последовательности выполняемых работ с учетом построенного графа работ дает возможность получить закон распределения суммарного времени выполнения работ и, как следствие, рассчитать гарантированное время выполнения всех работ на группе ЛА. Последовательный анализ вариантов работ различным составом специалистов позволяет обосновать состав бригады минимальной численности, которая может обеспечить с заданной надежностью подготовку группы ЛА в течение заданного времени.

### Список литературы


1. **Буряк Ю. И.** Алгоритм рационального планирования и распределения ресурсов в задаче подготовки группы ЛА к применению // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 5. С. 314—320.
2. **Буряк Ю. И.** Оперативная подготовка группы воздушных судов к применению за счет контроля деятельности инженерно-технического состава в реальном времени // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 12. С. 19—27.
3. **Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
4. **Голенко Д. И.** Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука, 1968. 400 с.
5. **Голенко-Гинзбург Д. И.** Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками. Воронеж: Научная книга, 2010. 284 с.
6. **Горевич Б. Н.** Применение стохастических сетевых графов для планирования комплекса работ в условиях неопределенности // Вооружение и экономика. 2014. № 4(29). С. 27—35.
7. **Исследование** операций: в 2 т.: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Т. 2. Модели и применение. М.: Мир, 1981. 677 с.
8. **Cai X., Wu X., Zhou X.** Optimal Stochastic Scheduling. New York: Springer, 2014. 416 p.
9. **Прилуцкий М. Х.** Оптимальное планирование двухстадийных стохастических производственных систем // Автомататика и телемеханика. 2014. № 8. С. 37—47.
10. **Баркалов С. А., Голенко-Гинзбург Д. И., Набиуллин И. Ф., Сидоренко Е. А.** Решение задач перспективного планирования и прогнозирования при случайных оценках продолжительности операций // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. № 3. С. 38—42.
11. **Михайлов Г. А., Войтишек А. В.** Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Изд. центр "Академия", 2006. 306 с.
12. **Пугачев В. С.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Физматлит, 2002. 496 с.
13. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
14. **Вадзинский Р. Н.** Справочник по вероятностным распределениям. СПб: Наука, 2001, 295 с.
15. **Хастингс Н., Пикок Дж.** Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика, 1980. 95 с.


# The Algorithm of Rational Planning and Resource Allocation in Preparing a Group of Aircraft for Use in Conditions of Uncertainty


**Yu. I. Buryak**[1], buryak@gosniias.ru, **A. A. Skrynnikov**[1], a1260@mail.ru
[1]State Research Institute of Aviation Systems, 125319, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author:* **Buryak Yuriy I.**, Ph.D.,
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: buryak@gosniias.ru



*Accepted on December 13, 2019*



***Abstract***

*The article considers the algorithm of rational planning of work on preparing a group of aircraft for departure, provided that the duration of each of the work is random. The work is carried out by specialists of different profiles with* restrictions — it is not allowed to simultaneously perform two or more work on one aircraft and the simultaneous work of a specialist on two or more aircraft. To evaluate the preparation plan for a group of aircraft for departure, the following indicators are taken: the time required to complete all work with a given guaranteed probability and the probability of all work being completed within a given time. To conduct a probabilistic analysis of the sequence of events that determine the progress of work, at the first stage a graph of work is built. When constructing the work graph, the restrictions imposed during the statement of the problem are taken into account by introducing fictitious works. At the second stage, on the basis of the constructed graph of work performance, a stochastic model is developed in which the duration of each work is modeled in accordance with a given distribution law. For many implementations, a distribution function of a random variable is constructed — the total time of preparation of a group of aircraft for departure, by which the values of the required performance indicators are determined. Peculiarities of constructing a graph of work performance are analyzed on the example of preparation for the departure of four aircraft. A detailed probabilistic analysis of a rational plan in conditions of uncertainty — with a random duration of work — was carried out on the example of a rational plan of work on a group of two aircraft. As a result of stochastic modeling, the distribution functions of the time moment of the end of each of the work, the delay time of the start of work and the time of the end of all work on the group of aircraft are constructed. Based on the obtained distribution laws, the dependences of the numerical characteristics of random variables — the number of completed work on the aircraft — on the current time were found. The obtained values of the performance indicators allow us to assess the acceptability of the checked rational plan. If, with rational planning of work by a team of a given composition, the guaranteed time to complete work on a group of aircraft is greater than the required value, then the composition of the team will increase. An algorithm has been developed to justify the composition of the minimum number of crews, which can provide training of a group of aircraft with a given reliability for a given time with a random duration of work.

***Keywords:*** *group of aircraft, maintenance, algorithm for calculating the composition of a team of specialists, real time, probability*

**Acknowledgements:** The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) according to the research project № № 18-08-00488a.

*For citation*:

**Buryak Yu.I., Skrynnikov A. A.** The Algorithm of Rational Planning and Resource Allocation in Preparing a Group of Aircraft for Use in Conditions of Uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2020, vol. 21, no. 6, pp. 375—382.

DOI: 10.17587/mau.21.375-382

### References

1. **Buryak Yu. I.** Algoritm ratsionalnogo planirovaniya i raspredeleniya resursov v zadache podgotovki gruppy LA k primeneniyu, *Mekhatronika. avtomatizatsiya. Upravleniye*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 314—320 (in Russian).
2. **Buryak Yu. I.** Operativnaya podgotovka gruppy vozdushnykh sudov k primeneniyu za schet kontrolya deyatelnosti inzhenerno-tekhnicheskogo sostava v realnom vremeni, *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*, 2018, no. 12, pp. 19—27 (in Russian).
3. **Venttsel E. S., Ovcharov L. A.** Teoriya veroyatnostey i eye inzhenernyye prilozheniya, Moscow, Nauka, 1988, 480 p. (in Russian).
4. **Golenko D. I.** Statisticheskiye metody setevogo planirovaniya i upravleniya, Moscow, Nauka, 1968, 400 p. (in Russian).
5. **Golenko-Ginzburg D. I.** Stokhasticheskiye setevyye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami. Voronezh, Nauchnaya kniga, 2010, 284 p. (in Russian).
6. **Gorevich B. N.** Primeneniye stokhasticheskikh setevykh grafov dlya planirovaniya kompleksa rabot v usloviyakh neopredelennosti, *Vooruzheniye i ekonomika*, 2014, no. 4(29), pp. 27—35 (in Russian).
7. **Moudera Dzh.. Elmagrabi S.** Issledovaniye operatsiy. Vol. 2. Modeli i primeneniye, Moscow, Mir, 1981, 677 p. (in Russian)
8. **Cai X., Wu X., Zhou X.** Optimal Stochastic Scheduling, New York, Springer, 2014, 416 p.
9. **Priluckij M. H.** Optimal'noe planirovanie dvuhstadijnyh stohasticheskih proizvodstvennyh system, *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 8, pp. 37—47 (in Russian).
10. **Barkalov S. A., Golenko-Ginzburg D. I., Nabiullin I. F., Sidorenko E. A.** Reshenie zadach perspektivnogo planirovaniya i prognozirovaniya pri sluchajnykh otsenkakh prodolzhitel'nosti operatsij, *Vestnik Voronezhskogo gosu-darstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 38—42 (in Russian).
11. **Mikhaylov G. A., Voytishek A. V.** Chislennoye statisticheskoye modelirovaniye. Metody Monte-Karlo, Moscow, Publishing centre Akademiya", 2006, 306 p. (in Russian).
12. **Pugachev V. S.** Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika, Moscow, Fizmatlit, 2002, 496 p. (in Russian).
13. **Venttsel' E. S.** Teoriya veroyatnostej, Moscow, Nauka, 1969. 576 p. (in Russian).
14. **Vadzinskij R. N.** Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam. SPb. Nauka, 2001, 295 p. (in Russian).
15. **Khastings N., Pikok Dzh.** Spravochnik po statisticheskim raspredeleniyam, Moscow, Statistika, 1980, 95 p. (in Russian).