

Ю. И. Буряк, д-р техн. наук, нач. подразделения, buryak@gosniias.ru,
А. А. Скрынников, канд. техн. наук, нач. сектора, a1260@mail.ru,
Государственный НИИ авиационных систем, Москва

Алгоритм рационального планирования и распределения ресурсов в задаче подготовки группы летательных аппаратов к применению¹

Работа посвящена решению задачи обоснования рационального состава бригады специалистов, обеспечивающих подготовку группы летательных аппаратов в течение заданного времени, для чего необходимо решить задачу планирования работ, выполняемых на группе летательных аппаратов различным составом специалистов. Это, в свою очередь, требует рассмотрения огромного числа вариантов упорядочивания работ, выполняемых на каждом летательном аппарате, и вариантов организации последовательности обслуживания одним специалистом нескольких летательных аппаратов. Поиск решения с использованием комбинаторной оптимизации требует неприемлемо больших вычислительных затрат.

В статье предлагается подход, ориентированный на нахождение не оптимального, а некоторого рационального допустимого решения, которое не намного хуже оптимального, но его определение не требует больших вычислительных ресурсов.

Предложен алгоритм рационального планирования работ, основанный на дискретно-событийном моделировании. Планирование ведется последовательно по времени. При планировании очередности выполнения работ предложено, в первую очередь, по возможности ставить работы, имеющие максимальную длительность. Разработанный алгоритм программно реализован, что позволило исследовать некоторые свойства получаемых решений. Приведены примеры расчета календарного графика выполнения работ на группе летательных аппаратов при различном составе бригады специалистов.

Задача обоснования рационального состава бригады решается с помощью алгоритма рационального планирования работ путем последовательного увеличения числа специалистов.

Приведен и подробно проанализирован пример обоснования рационального состава бригады специалистов, выполняющих подготовку группы из восьми летательных аппаратов, на каждом из которых выполняется пять видов работ. Высокая скорость выполнения расчетов по рациональному планированию работ заданным составом бригады позволила рассмотреть все возможные варианты состава бригады (десятки тысяч вариантов) и обосновать такой вариант, при котором число специалистов в бригаде было бы минимальным, но они обеспечивали бы подготовку авиационной техники в течение заданного времени.

Низкие требования к вычислительным ресурсам позволяют решать задачи при достаточно большом числе видов работ, выполняемых на каждом летательном аппарате группы.

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

Введение

При проведении технического обслуживания авиационной техники (АТ) возникает необходимость организации всего комплекса требуемых технологических операций, в том числе планирования и распределения инженерно-технического состава (ИТС) и средств технического обслуживания.

Вопросы совершенствования процессов инженерно-авиационного обеспечения (ИАО) неоднократно рассматривались в работах различных исследователей, прежде всего, сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 13 ГНИИ Минобороны России и др. Так, например, в работах [1–5] изложены порядок организации ИАО в мирное и военное время, правила организации технической эксплуатации, тех-

нического обслуживания и ремонта АТ, подготовки АТ к полетам, в том числе порядок построения типового технологического и сетевого графиков подготовки АТ к полету, вопросы оценки надежности АТ, эффективности ИАО и др. В работе [6] обсуждается применение теории массового обслуживания в задачах ИАО для количественной оценки эффективности ИАО боевых действий, приводятся примеры количественной оценки эффективности использования ИТС, самолетов и средств аэродромно-технического обеспечения.

В работах [7, 8] предложены математические модели задач оптимального планирования предполетной подготовки АТ и показано, что они относятся к классу экстремальных комбинаторных задач с линейной структурой.

Доказано, что подобные задачи относятся к числу так называемых NP-полных задач, для которых характерна неполиномиальная зависимость продолжительности решения задачи

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-08-00488а.

от ее размерности. Такие задачи считаются "труднорешаемыми" с вычислительной точки зрения, т. е. не поддающимися эффективному алгоритмическому решению. Решение подобных задач тривиальными методами может потребовать неприемлемо больших затрат машинного времени. Поэтому предлагаются алгоритмы комбинаторной оптимизации, направленные на использование свойства конечности множества вариантов решений и максимальное сокращение их перебора.

Задачи, связанные с упорядочиванием работ по времени, по исполнителям, по приборам с учетом накладываемых ограничений, решаются и с использованием теории расписаний [9, 12]. Целью решения таких задач является построение оптимального допустимого расписания.

В статье [12] автором рассмотрена задача оптимального планирования обработки различных деталей на двух станках (сначала деталь должна быть обработана на первом станке, а затем на втором). В связи с тем что при любой последовательности обработки деталей первый станок простаивать не будет, для минимизации общего времени обслуживания необходимо минимизировать время простоя второго станка. Анализ зависимости простоя второго станка от порядка следования деталей позволил сформулировать достаточно простой алгоритм для составления расписания работы двух станков.

Аналогичный подход можно использовать для решения задачи планирования работ на группе летательных аппаратов (ЛА).

Ограничения, связанные с требуемой очередностью выполнения работ, с возможностью одновременной работы на одном ЛА нескольких специалистов и возможностью одновременного использования средств технического обслуживания, достаточно просто формализуются, и задача оптимизации сводится к задаче линейного программирования. Однако необходимость рассмотрения огромного числа вариантов упорядочивания работ, выполняемых на одном ЛА, вариантов организации последовательности обслуживания одним специалистом нескольких ЛА может потребовать неприемлемо большого времени для проведения расчетов.

В значительной мере объемы вычислений будут расти при решении задачи обоснования требуемого числа специалистов, обслуживающих группу ЛА при заданном ограничении на время ее подготовки. В связи с этим возникает необходимость нахождения не оптимального,

а некоторого рационального допустимого решения, которое было бы не намного хуже оптимального, но для нахождения которого не требовались бы большие вычислительные ресурсы.

В данной работе предлагается алгоритм обоснования состава бригады специалистов, которая обеспечила бы возможность подготовки группы однотипных ЛА к применению в течение заданного времени. При решении задачи для каждого рассматриваемого варианта состава бригады находится рациональное допустимое расписание.

Постановка задачи

Известно множество I группы ЛА, которые необходимо подготовить к применению в течение заданного периода времени $T_{\max}$, характеризующего числом λ полуоткрытых интервалов, каждый из которых имеет длину $T_{\max}/\lambda$. Заданное время вылета i -го ЛА, $i \in I$, соответствует k_i^B -му интервалу, укладывающемуся в период времени $T_{\max}$, $k_i^B \leq \lambda$.

Подготовка i -го ЛА состоит из последовательного набора технологических операций (работ), число которых R_i . Для операции под номером $1 \leq r \leq R_i$ известны номера $k_{i,r}^{no}, k_{i,r}^{ko}$ интервалов времен начала и окончания выполнения этой операции. Операции выполняются последовательно, т. е. для $1 \leq r \leq R_i - 1$ выполняется $k_{i,r+1}^{no} = k_{i,r}^{ko} + 1$. Понятно также, что должно выполняться свойство $k_{i,R_i}^{ko} \leq k_i^B - 1$, означающее, что вылет ЛА может произойти только тогда, когда все операции выполнены.

Для подготовки группы ЛА к вылету имеется бригада из специалистов различных категорий, множество которых мы обозначим J . Для $j \in J$ обозначим n_j число имеющихся специалистов j -й категории. Для каждой r -й технологической операции подготовки i -го ЛА определено множество $J_{i,r} \in J$ категорий необходимых специалистов. Предполагается, что для выполнения r -й работы необходим один специалист каждой категории из множества $J_{i,r}$.

Для определения потребности в специалистах различных категорий, участвующих в процессе подготовки i -го ЛА, определим функцию $\Delta_{i,r,j} : \{1, 2, \dots, \lambda\} \rightarrow \{0, 1\}$, $i \in I, 1 \leq r \leq R_i, j \in J$:

$$\Delta_{i,r,j}(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in J_{i,r} \text{ и } k_{i,r}^{no} \leq k \leq k_{i,r}^{ko}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Таким образом, функция $\Delta_{i,r,j}(k)$ принимает значение 1 тогда и только тогда, когда k -й интервал времени попадает на период выполнения r -й операции, а также для выполнения этой операции необходим специалист категории j . В противном случае функция $\Delta_{i,r,j}(k)$ принимает значение 0. Удобно продолжить функцию $\Delta_{i,r,j}$ на все целые числа: $\Delta_{i,r,j}(k) = 0$ для $k \in \mathbb{Z} \setminus \{1, 2, \dots, \lambda\}$.

Начало выполнения r -й операции подготовки i -го ЛА может произойти с задержкой, вызванной занятостью нужного специалиста на другом ЛА. Обозначим эту задержку $\text{del}_{i,r}$. Тогда условие того, что каждое ЛА будет готово ко времени вылета, записывается в виде

$$k_{i,R_i}^{ko} + \sum_{r=1}^{R_i} \text{del}_{i,r} \leq k_i^B - 1, i \in I, \quad (1.1)$$

а условие того, что в любой момент времени будет обеспечиваться необходимое число специалистов, — в виде

$$\sum_{i \in I} \sum_{r=1}^{R_i} \Delta_{i,r,j} \left(k - \sum_{r'=1}^r \text{del}_{i,r'} \right) \leq n_j, \quad j \in J, k = 1, \dots, \lambda. \quad (1.2)$$

Таким образом, задача о минимизации бригады специалистов для подготовки группы ЛА ставится следующим образом. Необходимо найти такие наборы чисел $(n_j)_{j \in J}$ и $(\text{del}_{i,r})_{i \in I, 1 \leq r \leq R_i}$, при которых:

- 1) $\sum_{j \in J} n_j = \min$;
- 2) выполняются ограничения

$$k_{i,R_i}^{ko} + \sum_{r=1}^{R_i} \text{del}_{i,r} \leq k_i^B - 1, i \in I;$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r=1}^{R_i} \Delta_{i,r,j} \left(k - \sum_{r'=1}^r \text{del}_{i,r'} \right) \leq n_j, j \in J, k = 1, \dots, \lambda.$$

Алгоритм рационального планирования работ при заданном составе бригады

Для решения поставленной задачи используется дискретно-событийное моделирование, при котором каждый ЛА группы может находиться в одном из состояний: "ожидание обслуживания", "обслуживание (выполнение i -й работы)", "готовность к выполнению полета", а событие перехода

из одного состояния в другое осуществляется в дискретные моменты времени.

В качестве примера на рис. 1 приведена схема моделирования процесса обслуживания двух ЛА бригадой, выполняющей три вида работ; в состав бригады входят два специалиста, допущенных к выполнению работы № 1 и по одному специалисту, допущенных к выполнению работ № 2 и № 3. В моменты начала и окончания работ происходит смена состояний специалистов ("работник свободен", "работник занят").

Сначала рассмотрим общий случай — работы не упорядочены. Анализируя календарный график работ при различных вариантах их упорядочивания при $K = \{1, 1, \dots, 1\}$ (т. е. когда в составе бригады по одному специалисту каждой специальности), можно сделать вывод о том, что необходимым условием для минимизации времени обслуживания всей группы ЛА является отсутствие простоев у специалиста, длительность работы которого максимальна.

В связи с этим при планировании очередности выполнения работ предлагается в первую очередь по возможности ставить работы, имеющие максимальную длительность.

Планирование предлагается вести последовательно по времени, начиная с $t = 0$, с шагом Δt .

Алгоритм заключается в следующем.

Определяем текущее время t . Рассматриваем j -й ЛА (начиная с $j = 1$). Для рассматриваемого ЛА формируются множества $A_j(t)$ и $B_j(t)$. Множество $A_j(t) = \{a_1(t), \dots, a_m(t)\}$ включает элементы $a_i(t)$, каждый из которых принимает два возможных значения: $a_i(t) = 0$, если i -й работы на j -м ЛА к моменту времени t выполнена (или же начата), и $a_i(t) = 1$ в противном случае. Множество $B_j(t) = \{b_1(t), \dots, b_m(t)\}$ включает элементы $b_i(t)$, значения которых равны числу свободных к моменту времени t специалистов, допущенных к выполнению i -й работы. Тогда $C_j(t) = A_j(t)B_j(t)$ будет включать множество свободных специалистов, готовых к выполнению

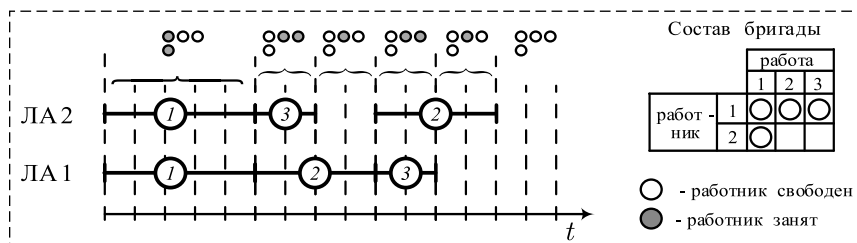


Рис. 1. Схема моделирования процесса обслуживания группы ЛА
Fig. 1. The scheme of modeling the process of servicing a group of aircraft

еще не начатых работ на j -м ЛА. Если множество $C_j(t)$ имеет отличные от нуля элементы, то к выполнению в момент времени t j -м ЛА назначается такая работа i^* , время выполнения которой максимально среди всех работ, для которых $c_{i^*}(t) > 0$:

$$i^* : t_{i^*} = \max\{t_1, \dots, t_m\} \wedge c_{i^*}(t) > 0.$$

Принимаем $a_{i^*}(t) = 0$, а значение элемента $b_{i^*}(t)$ уменьшается на единицу.

После этого переходим к $(j + 1)$ -му ЛА ($j + 1 \leq n$). При $j + 1 > n$ переходим к следующему моменту времени $t + \Delta t$.

Программная реализация предложенного алгоритма показала высокую скорость расчетов рационального варианта, в том числе при большом числе выполняемых работ, при большой численности группы ЛА и любой численности специалистов каждого направления.

В качестве примера на рис. 2 приведен календарный график выполнения пяти работ на двух ЛА при $K = \{1, 1, 1, 1, 1\}$, $t_1 = 1$; $t_2 = 8$; $t_3 = 3$; $t_4 = 4$; $t_5 = 2$.

Для рассматриваемого примера время подготовки группы составило бы 18 единиц времени. Полученный план при заданных условиях не является оптимальным — все работы будут завершены за 19 единиц времени. Это объясняется тем, что в соответствии с предложенным алгоритмом при $t = 7$ на втором ЛА

началась работа J_5 , которая еще не закончилась в момент освобождения специалиста 2, выполняющего работу наибольшей продолжительности.

Предложенный алгоритм хорошо работает и при $k_i > 1$. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчетов календарного плана при $K = \{1, 2, 1, 1, 1\}$ и тех же значениях t_i . Так как два человека выполняют вторую работу, то для справки на календарном графике выполнения этой работы обозначен порядковый номер специалиста.

При частично упорядоченных работах при выборе очередной работы проводится проверка соблюдения порядка выполнения работ.

Анализ решений, полученных для различных исходных данных, показал, что рациональное планирование с использованием предложенного алгоритма не намного хуже потенциально возможного оптимального решения, а простота реализации позволяет оперативно рассмотреть различные варианты комплектования бригады специалистами.

Обоснование рационального состава бригады специалистов

Так как решение о планировании очередности выполнения работ является рациональным, то и решение о составе бригады, необходимой для подготовки группы ЛА в заданный срок, также будет рациональным.

Задачу предлагается решать путем последовательного увеличения числа специалистов группы.

Рассмотрим пример. К вылету готовится группа, состоящая из восьми ЛА. На каждом из ЛА проводится пять видов работ ($t_1 = 1$; $t_2 = 8$; $t_3 = 3$; $t_4 = 4$; $t_5 = 2$).

Теоретически состав бригады может изменяться от минимального (при $K = \{1, 1, 1, 1, 1\}$) до максимального (при $K = \{8, 8, 8, 8, 8\}$), т. е. суммарное число s специалистов может варьироваться от 5 до 40 человек. При $K = \{8, 8, 8, 8, 8\}$ на каждый ЛА выделяется полный комплект специалистов и полное время подготовки группы ЛА не превышает времени подготовки одного ЛА. Увеличение бригады

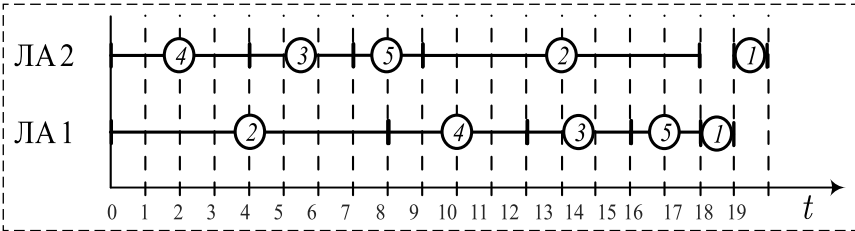


Рис. 2. Календарный график выполнения работ на группе ЛА
Fig. 2. Schedule of work on the aircraft group

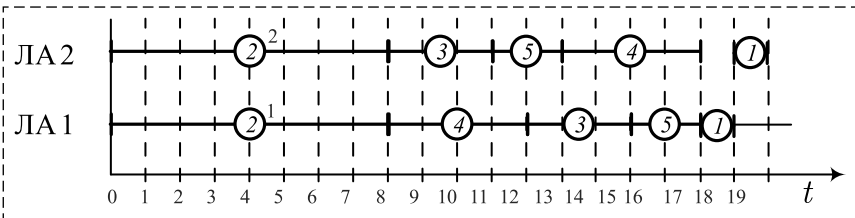


Рис. 3. Результаты рационального расчета календарного плана выполнения работ на группе ЛА
Fig. 3. The results of the rational calculation of the schedule of work on a group of aircraft

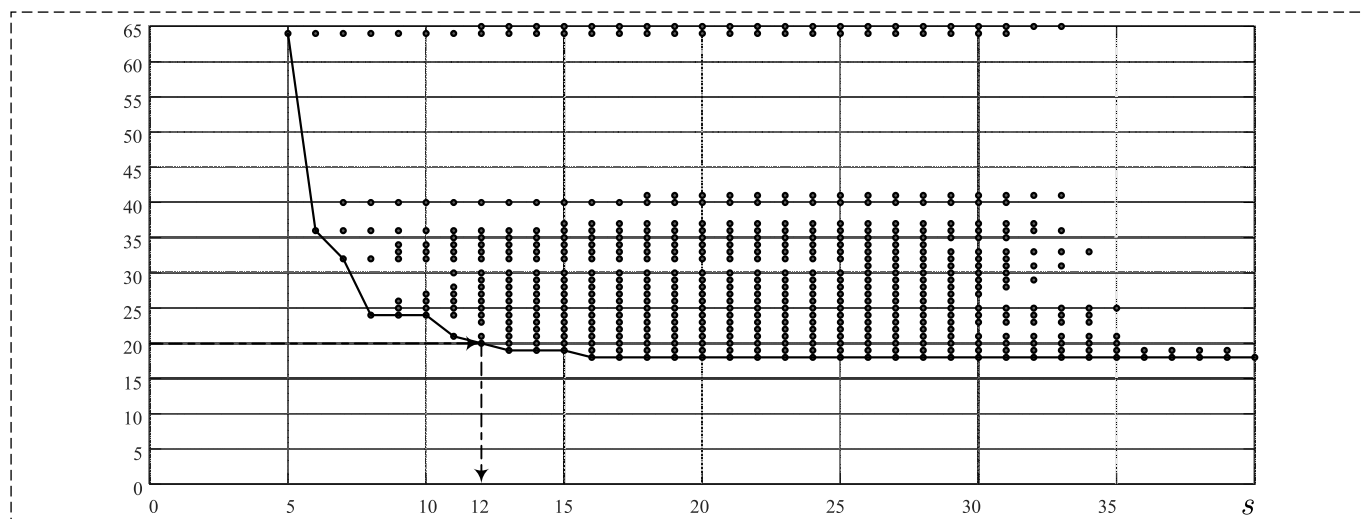


Рис. 4. Зависимость времени подготовки группы ЛА от числа привлеченных специалистов

Fig. 4. Dependence of the training time of the aircraft group on the number of specialists involved

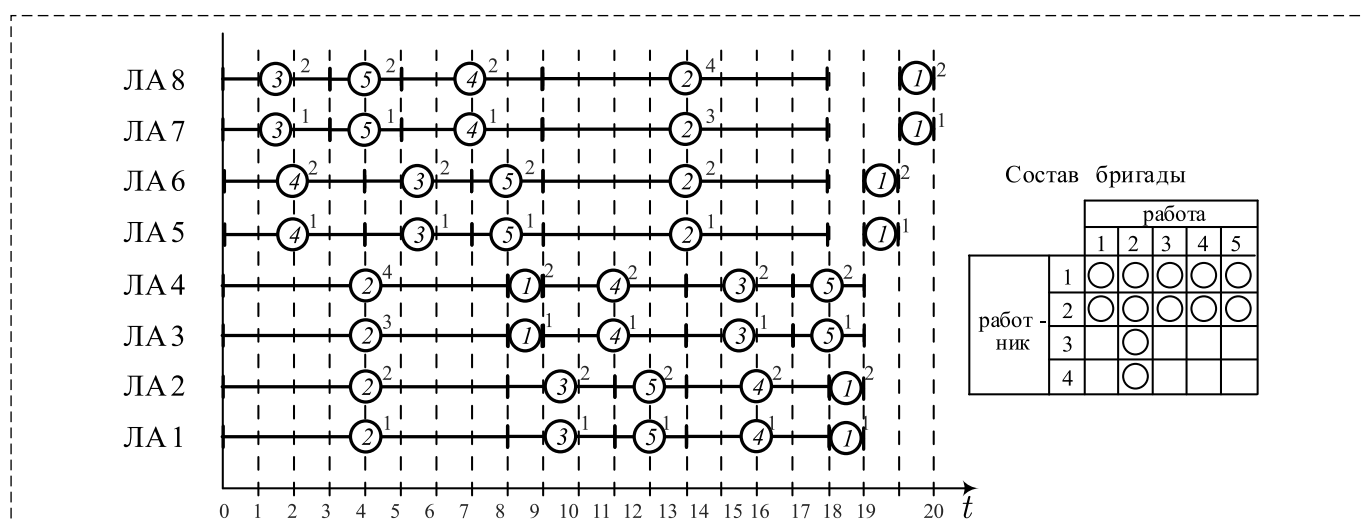


Рис. 5. Результаты рационального планирования последовательности работ для бригады расчетного состава

Fig. 5. The results of the rational planning of the sequence of work for the brigade of the estimated composition

с 5 до 6 человек требует рассмотрения 5 вариантов состава специалистов, до 7 человек — еще 35 вариантов, до 8 — еще 70 вариантов и т.д. При увеличении состава бригады от минимального размера до максимального при $n = 8$, $m = 5$ необходимо рассмотреть 32 768 вариантов. В такой ситуации большим достоинством рассматриваемого алгоритма является его быстроедействие.

Результаты рационального планирования работ на группе самолетов приведены на рис. 4; по оси абсцисс отложены значения суммарного числа s специалистов, по оси ординат — время подготовки группы ЛА.

Так, например, при $s = 5$ подготовка группы ЛА занимает 65 ед. времени; при $s = 7$ —36 ед.

времени; при $s = 8$ —24 ед. времени и т. д. Очевидно, что в предельном случае (при $s = 40$) время подготовки группы ЛА будет минимальным и равно времени подготовки одного ЛА, т. е. 18 ед. времени. Но, как видно из результатов расчетов, этого же результата можно добиться и существенно меньшим составом; так, при $s = 16$ время подготовки группы ЛА также равно 18 ед. времени.

Пусть допустимое время подготовки ЛА составляет 20 ед. времени. В соответствии с результатами расчетов бригада должна включать 12 человек (рис. 4); состав бригады определяется множеством $K = \{2, 4, 2, 2, 2\}$. Результаты рационального планирования работ для такого состава бригады приведены на рис. 5.

Заключение

Предложен подход к решению задачи определения состава бригады специалистов, которая обеспечила бы возможность подготовки группы однотипных ЛА к применению в течение заданного времени. Разработан алгоритм рационального планирования работ при заданном составе бригады. Показано, что использование рационального алгоритма планирования работ на АТ позволяет избежать громоздких вычислений, связанных с комбинаторной оптимизацией. Большая скорость вычислений позволяет легко решать задачу обоснования требуемого числа специалистов ИТС, необходимого для обслуживания группы ЛА в течение заданного времени. Проведено обоснование рационального состава бригады специалистов, обеспечивающих подготовку определенного состава группы ЛА к заданному времени, доказывающее применимость предложенного подхода.

Список литературы

1. Яблонский С. Н., Яковышенко О. В., Шумский А. В. Инженерно-авиационное обеспечение боевых действий и боевой подготовки частей авиации Вооруженных Сил:

учебник для инженерно-технических вузов ВВС / Под ред. С. Н. Яблонского. М.: Изд-во ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2009.

2. Инженерно-авиационная служба, эксплуатация и ремонт авиационной техники / Под ред. К. М. Шпилева. М.: Воениздат, 1979.

3. Шпилев К. М., Сидяев Н. М. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов / Под ред. Н. М. Сидяева. М.: Воениздат, 1970.

4. Новиков И. А., Романов Н. М., Степанов С. В. Эксплуатация боевой авиационной техники / Под ред. В. В. Филиппова. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1982.

5. Ефименко А. Ф., Ковалюк Н. П. Эксплуатация боевой авиационной техники: учебник для инженерно-технических вузов ВВС / Под ред. М. В. Кузнецова. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1999.

6. Писарев В. Н. Применение теории массового обслуживания в задачах инженерно-авиационного обеспечения. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1965.

7. Математические модели задач оптимального планирования предполетной подготовки летательных аппаратов. URL: [https://pandia.ru/text/80/171/33237.php/](https://pandia.ru/text/80/171/33237.php) (дата обращения 26.08.2018).

8. Алгоритмы решения задач оптимального планирования предполетной подготовки летательных аппаратов. URL: <https://gigabaza.ru/doc/177593.html/> (дата обращения 30.08.2018).

9. Лазарев А. А., Гафаров Е. Ф. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011.

10. Портал В. М., Семенов А. И. Теория расписаний. М.: Знание, 1972.

11. Brucker P. Scheduling algorithms. New York: Springer, 2007.

12. Johnson S. M. Optimal two-and-three-stage production schedules with set-up times included // Naval Research Logistic. 1954. Vol. 1. P. 61–68.

Algorithm of Rational Planning and Resource Distribution in the Task of Preparing the Aircraft Group for Use

Yu. I. Buryak, buryak@gosniias.ru, A. A. Screennikov, a1260@mail.ru,
The State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation

Corresponding author: Buryak Yuri I., D. Sc., Head of Unit, The State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: buryak@gosniias.ru

The work is devoted to solving the problem of justifying the rational composition of a team of specialists who provide preparing for a group of aircraft for a given time. To substantiate the optimal composition of the team, it is necessary to solve the problem of scheduling work on a group of aircraft with different composition of specialists. This, in turn, requires consideration of the huge number of options for streamlining work performed on each aircraft, and options for organizing the sequence of maintenance by one specialist of several aircraft. Finding solutions using combinatorial optimization requires an unacceptably high computational cost. The article proposes an approach for finding not the optimal, but some rational admissible solution, which is not much worse than the optimal one, but its definition does not require large computational resources. An algorithm for rational work scheduling based on discrete-event modeling is proposed. Planning is carried out sequentially in time. When planning the sequence of work, it was suggested first of all to put the work with the maximum duration possible. The developed algorithm is software implemented, which allowed to investigate some properties of the solutions obtained. Examples of calculating the schedule of work on a group of aircraft with a different composition of the team of specialists are given. The problem of justification of rational structure of the team is solved by rational planning algorithm works by sequentially increasing the number of specialists. An example of substantiating the rational composition of a team of specialists performing preparing of a group of eight aircraft, each of which performs five types of work, is given and analyzed in details. The high speed of the calculations for the rational planning of work by a given team allowed to consider all possible options for the team (tens of thousands of options) and substantiate such an option that the number of specialists in the team would be minimal, but they would ensure the preparation of aircraft for a given time. Low requirements for computing resources allow solving problems with a sufficiently large number of types of work performed on each aircraft of the group.

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

Acknowledgements: This work was supported by RFBR, project number № 18-08-00488a.

For citation:

Buryak Yu. I., Scrennikov A. A. Algorithm of Rational Planning and Resource Distribution in the Task of Preparing the Aircraft Group for Use, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 314–320.

DOI: 10.17587/mau.20.314-320

References

1. **Yablonskij S. N., Yakovyshenko O. V., Shumskij A. V.** *Inzhenerno-aviacionnoe obespechenie boevykh dejstvij i boevoy podgotovki chastej aviacii Vooruzhennyh Sil* (Engineering and aviation support of combat operations and combat training of aviation units of the Armed Forces), Moscow, Publishing house of VVA im. prof. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2009 (in Russian).
2. **Shpilev K. M.** ed. *Inzhenerno-aviacionnaya sluzhba, ehkspluatatsiya i remont aviacionnoj tekhniki* (Engineering and aviation service, operation and repair of aircraft), Moscow, Voenizdat, 1979 (in Russian).
3. **Shpilev K. M., Sidyaev N. M.** *Inzhenerno-aviacionnaya sluzhba i ehkspluatatsiya letatel'nyh apparatov* (Engineering and aviation service and operation of aircraft), Moscow, Voenizdat, 1970 (in Russian).
4. **Novikov I. A., Romanov N. M., Stepanov S. V.** *Ehkspluatatsiya boevoy aviacionnoj tekhniki* (Operation of combat aircraft), Moscow, Publishing house of VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1982 (in Russian).

5. **Efimenko A. F., Kovalyuk N. P.** *Ehkspluatatsiya boevoy aviacionnoj tekhniki* (Operation of combat aircraft), Moscow, Publishing house of VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1999 (in Russian).

6. **Pisarev V. N.** *Primenenie teorii massovogo obsluzhivaniya v zadachah inzhenerno-aviacionnogo obespecheniya* (Application of queuing theory in the problems of engineering and aviation support), Moscow, Publishing house of VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1965 (in Russian).

7. **Matematicheskie modeli zadach optimal'nogo planirovaniya predpoletnoj podgotovki letatel'nyh apparatov** (Mathematical models of problems of optimal planning of pre-flight preparation of aircraft), available at: <https://pandia.ru/text/80/171/33237.php/> (дата обращения 26.08.2018) (in Russian).

8. **Algoritmy resheniya zadach optimal'nogo planirovaniya predpoletnoj podgotovki letatel'nyh apparatov** (Algorithms for solving problems of optimal planning of pre-flight preparation of aircraft), available at: <https://gigabaza.ru/doc/177593.html/> (дата обращения 30.08.2018) (in Russian).

9. **Lazarev A. A., Gafarov E. F.** *Teoriya raspisanij. Zadachi i algoritmy* (The theory of schedules. Tasks and algorithms), Moscow, Publishing house MGU im. M. V. Lomonosova, 2011 (in Russian).

10. **Portal V. M., Semyonov A. I.** *Teoriya raspisanij* (The theory of schedules), Moscow, Znanie, 1972 (in Russian).

11. **Brucker P.** *Scheduling algorithms*, New York, Springer, 2007.

12. **Johnson S. M.** Optimal two-and-three-stage production schedules with set-up times included, *Naval Research Logistic*, 1954, vol. 1, pp. 61–68.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 27.02.2019. Подписано в печать 10.04.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН519. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.