

УДК 629.7.083

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648

Для цитирования: Гусев Е. В., Родченко В. В. Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 638–648. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648.

For citation: Gusev E. V., Rodchenko V. V. Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 638–648. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648.

Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов

Е. В. Гусев, В. В. Родченко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: ccg-gus@mail.ru

На сегодняшний день можно выделить ряд перспективных многоразовых ракет-носителей «Крыло СВ» – многоразовая крылатая ступень ракеты-носителя легкого класса; «Байкал-Ангара» многоразовый ускоритель первой ступени ракеты-носителя Ангара; «Союз-7» – многоразовая двухступенчатая ракета-носитель среднего класса, летно-конструкторские испытания «Союза-7» планируются на 2025 г. Для поддержания эксплуатационных характеристик летательных аппаратов необходимо разработать систему технического обслуживания, обеспечивающую заданную надежность агрегатов летательных аппаратов. Целью данной работы является разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания агрегатов и систем летательных аппаратов. В рамках данной работы разработан алгоритм, в основе которого заложен метод статистических испытаний, позволяющий при небольших затратах машинного времени более детально проанализировать процесс технического обслуживания с учетом длительности выполнения отдельных операций и их эффективности. Данные о длительности и эффективности отдельных операций могут быть получены в процессе специальных испытаний аппаратуры путем хронометража и анализа результатов обслуживания. Для моделирования необходимо иметь следующие исходные данные: закон распределения продолжительности отдельных операций; эффективность выявления неисправностей при проведении отдельных операций. В алгоритме реализуется два вида технического обслуживания: полное и сокращенное. Сокращенное обслуживание предусматривает проведение операций, наиболее эффективных с точки зрения количества устраняемых неисправностей: регулировок, подстроек, поиска неисправных элементов. Разработанная модель позволяет исследовать возможность сокращения времени простоя на обслуживании без существенного снижения качества технического обслуживания, а именно: оценить эффективность технического обслуживания при проведении его по полной и сокращенной схеме; оценить эффективность технического обслуживания при проведении обслуживания в ограниченное время; обосновать наиболее целесообразные пути повышения качества обслуживания при условии, что время простоя на техническом обслуживании ограничено, и прогнозировать вероятность выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания. Практическая значимость итогов данной работы может быть достигнута в аэрокосмической отрасли, в частности, на этапе проектирования (испытаний и эксплуатации) системы технического обслуживания для многоразовых элементов ракет-носителей.

Ключевые слова: модель выявления неисправностей, техническое обслуживание, восстановление, техническая диагностика, прогнозирование неисправностей, контролируемый параметр.

Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems

E. V. Gusev, V. V. Rodchenko

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: ccg-gus@mail.ru

Today, we can single out a number of promising reusable launch vehicles “SV Wing” – a reusable cruise stage of a light-class launch vehicle; “Baikal-Angara” reusable booster of the first stage of the Angara launch vehicle; “Soyuz-7” is a reusable two-stage medium-class launch vehicle; flight design tests of “Soyuz-7” are planned for 2025. To maintain the operational characteristics of aircraft, it is necessary to develop a maintenance system that ensures the specified reliability of aircraft assemblies. The purpose of this work is to develop a model for detecting malfunctions in the process of maintenance of units and systems of aircraft. Within the framework of this work, an algorithm has been developed, which is based on the method of statistical testing, which allows, at low computer time, to analyze the maintenance process in more detail, taking into account the duration of individual operations and their effectiveness. Data on the duration and efficiency of individual operations can be obtained in the process of special tests of equipment by timing and analysis of service results. For modeling it is necessary to have the following initial data: the law of distribution of the duration of individual operations; the effectiveness of troubleshooting during individual operations. The algorithm implements two types of maintenance: full and reduced. Reduced maintenance provides for operations that are most effective in terms of the number of faults to be eliminated: adjustments, adjustments, search for faulty elements. The developed model makes it possible to investigate the possibility of reducing the downtime for maintenance without a significant decrease in the quality of maintenance, namely: to assess the effectiveness of maintenance when it is carried out according to the full and reduced scheme; evaluate the effectiveness of maintenance when performing maintenance in a limited time; justify the most appropriate ways to improve the quality of service, provided that the downtime for maintenance is limited and predict the likelihood of detecting malfunctions during the maintenance process. The practical significance of the results of this work can be achieved in the aerospace industry, in particular, at the design stage (testing and operation) of a maintenance system for reusable elements of launch vehicles.

Keywords: fault detection model, maintenance, recovery, technical diagnostics, fault prediction, controlled parameter.

Введение

К летательным аппаратам (ЛА) предъявляют жесткие требования по безопасности, надежности, экономичности и влиянию на окружающую среду. Поэтому при разработке ЛА стараются учесть все возможные факторы, которые будут оказывать воздействие на ЛА, и воздействия самого ЛА на окружающую среду. Также важно учитывать стремление увеличить срок активного существования из-за применения новых материалов и технологий производства, что, в свою очередь, увеличивает затраты на непосредственное производство ЛА и поддержание его в процессе эксплуатации.

Разработка ракет-носителей (РН) с многоразовой первой ступенью – одна из актуальных задач, так как конкуренция на рынке по доставке полезной нагрузки на целевые орбиты возрастает,

стоимость вывода одного килограмма полезной нагрузки уменьшается и некоторые РН, не выдерживая конкуренции, становятся неактуальными. Восстановление ступени РН после полета, обслуживание, ремонт и замена неисправных элементов – это основная задача системы технического обслуживания. Проектирование, испытание и эксплуатация системы технического обслуживания – неотъемлемая часть процесса эксплуатации РН в целом.

Техническое обслуживание агрегатов и систем ЛА

Техническое обслуживание элементов и систем ЛА является основным методом предотвращения неисправностей. При техническом обслуживании проводится поиск неисправностей и их устранение. Для большинства типов аппаратуры ЛА можно выделить следующие характерные этапы технического обслуживания, каждый из которых включает определенные виды работ [1–2].

1. Проведение внешнего осмотра и проверка аппаратуры «без тока»:

- подготовка контрольно-измерительных приборов;
- разборка аппаратуры, осмотр состояния (например, креплений, паек или монтажа);
- проверка качества изоляции монтажа кабелей;
- автономная проверка точности срабатывания отдельных устройств с помощью простейшей

контрольно-измерительной аппаратуры.

2. Проверка и испытания узлов и блоков аппаратуры под током:

- регулировка и настройка некоторых элементов и устройств;
- проверка работоспособности элементов и устройств аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- поиск неисправных элементов и устранение неисправностей с заменой или без замены элементов.

3. Регламентные работы:

- проверка состояния (например, контактов реле, механических узлов);
- чистка отдельных узлов и аппаратуры в целом;

4. Проведение контроля функционирования аппаратуры в целом:

- сборка и комплектация аппаратуры;
- контроль параметров аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- комплексная отладка и настройка аппаратуры.

В процессе выполнения технического обслуживания на каждом этапе осуществляются операции по выявлению неисправных элементов, их замене или восстановлению.

На первом этапе обслуживания (внешний осмотр аппаратуры «без тока») такими операциями являются выявление и замена неисправных элементов: обгоревших сопротивлений, износившихся разъемов, проверяется состояние контактов реле и пр.

На втором этапе проводятся испытания аппаратуры «под током». При этом поиск и восстановление неисправных элементов осуществляется лишь в том случае, когда не удастся установить исходные режимы работы или пределы срабатывания отдельных устройств аппаратуры с помощью органов регулировки.

На третьем этапе (регламентные работы) проводятся мероприятия (чистка, замена смазок и т. д.), направленные на устранение условий, способствующих появлению неисправностей.

На четвертом этапе (проверка функционирования аппаратуры в целом, отладка и настройка ее в соответствии с заданными техническими условиями) также может проводиться поиск и устранение неисправностей. При этом часть работ, проводимых ранее, повторяется, например, настройка отдельных узлов, проверка монтажа, регулировка контактов и т. д. Ориентировочное распределение выявляемых неисправностей по видам операций, связанных с устранением неисправностей, и этапам технического обслуживания приведено в табл. 1 [2–3]. Из таблицы видно, что на отдельных этапах технического обслуживания некоторые операции проводятся (знак «+»), не проводятся (знак «–») или проводятся не всегда (знак «±»).

Все операции технического обслуживания делятся на три типа:

- операции, связанные с выявлением неисправностей (поиск неисправных элементов);
- операции, связанные с устранением неисправностей (регулировка, настройка, замена);
- вспомогательные операции (подготовка контрольно-измерительной аппаратуры, разборка, сборка, отбраковка запасных элементов).

На основе анализа статистических данных по эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры ЛА можно ориентировочно распределить общее время технического обслуживания по видам операций (табл. 2) [2–3].

Как следует из табл. 1 и 2, почти на всех этапах технического обслуживания выполняются работы, связанные с поиском, выявлением и устранением неисправностей, время выполнения которых случайно и составляет основную часть времени обслуживания.

Аналитический метод оценки вероятности выявления неисправностей

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что мероприятия ТО могут предотвратить значительную часть отказов. При этом статистическая оценка вероятности предотвращения отказов $P_{ПВ}$ в общем случае может быть оценена отношением:

$$P_{ПВ} = \frac{n_{ПВ}}{n_{П}}, \quad (1)$$

где $P_{ПВ}$ – статистическая оценка вероятности предотвращения отказов при проведении ТО; $n_{П} = n_{ПВ} + n_{ПН}$ – общее число предотвращаемых отказов, которое определяется неисправностями, накопленными к моменту проведения ТО; $n_{ПВ}$, $n_{ПН}$ – число неисправностей, выявленных и не выявленных в процессе ТО, соответственно (предполагается, что все выявленные неисправности могли привести к отказу агрегатов и систем ЛА).

Таким образом, $P_{ПВ}$ – является одним из основных показателей количественной оценки эффективности технического обслуживания.

Таблица 1

Операции, проводимые на различных этапах ТО

Операции, связанные с устранением неисправностей	Выявление неисправности, %	Этапы технического обслуживания			
		Проверка без тока, 1	Проверка под током, 2	Регламентные работы, 3	Комплексная отладка, 4
Устранение неисправностей путем замены элементов или без замены	20–40	±	±	±	±
Чистка, смазка	10–20	–	–	+	–
Регулировка и настройка	40–70	–	+	–	+

Таблица 2

Распределение времени обслуживания по видам операций

Операция ТО	Время, затрачиваемое на ТО, %	Закон распределения длительности операции
Поиск неисправностей	60–80	Экспоненциальный
Устранение неисправностей	10–20	Релеевский, нормальный
Вспомогательные операции	10–20	Нормальный

В модели прогнозирования отказов элемента выявление неисправностей представляет собой упорядоченный процесс и $P_{\text{ПВ}}$ в основном зависит от метода прогнозирования и времени, отводимого на этот процесс.

Примем, что вероятность пропуска неисправного элемента из-за неточного измерения параметра β и вероятность пропуска неисправного элемента из-за недостатка времени $Q(T_{\text{П}})$ являются независимыми. Тогда вероятность предотвращения отказов при проведении ТО может быть представлена в виде произведения:

$$P_{\text{ПВ}}(T_{\text{П}}) = (1 - \beta)[1 - Q(T_{\text{П}})], \quad (2)$$

$$\text{где } Q(T_{\text{П}}) = \begin{cases} 1 - LT_{\text{П}}, & 0 \leq T_{\text{П}} \leq T_{\text{П0}}, \\ 0, & T_{\text{П}} \geq T_{\text{П0}}. \end{cases}$$

Здесь $L = \frac{1}{T_{\text{П0}}}$, а $T_{\text{П0}}$ – среднее время, требуемое для обслуживания; $\beta = \frac{\sigma_{\beta}}{\alpha(t)}$ – относительная погрешность, где σ_{β} среднеквадратическая ошибка; $\alpha(t)$ – значение параметра α в момент времени t .

С учетом принятых обозначений (2) преобразуется к виду

$$P_{\text{ПВ}}(T_{\text{П}}) = (1 - \beta)LT_{\text{П}}. \quad (3)$$

Соотношение (3) может быть использовано для ориентировочной оценки вероятности выявления неисправностей при проведении технического обслуживания и прогнозирования.

Оценка вероятности выявления неисправности при техническом обслуживании

В основе модели выявления неисправностей в процессе проведения ТО агрегатов и систем ЛА заложен алгоритм, который реализует метод статистических испытаний [4–6].

При рассмотренной выше аналитической оценке $P_{\text{ПВ}}$ не учитывается эффективность отдельных операций технического обслуживания.

Метод статистического моделирования позволяет при небольших затратах машинного времени более детально проанализировать процесс технического обслуживания с учетом длительности выполнения отдельных операций и их эффективности (табл. 1 и 2). Данные о длительности и эффективности отдельных операций могут быть получены в процессе специальных испытаний аппаратуры путем хронометража и анализа результатов ТО.

Для моделирования необходимо иметь следующие исходные данные:

- закон распределения продолжительности отдельных операций;
- эффективность выявления неисправностей при проведении отдельных операций (доля выявленных неисправностей из общего числа накопленных к началу ТО).

В алгоритме реализуется два вида ТО: полное и сокращенное, блок-схема алгоритма представлена на рис. 1 Сокращенное обслуживание предусматривает проведение операций, наиболее эффективных с точки зрения количества устраняемых неисправностей: регулировок, подстроек, поиска неисправных элементов (табл. 1).

Процесс технического обслуживания оценивается: $P_{\text{ПВ}} = f(T_{\text{П}}, T_{\text{П0}})$, где $T_{\text{П}}$ – время, отводимое для ТО; $T_{\text{П0}} = M[\tau_{\text{П}}]$ – среднее время проведения ТО.

Для оценки $P_{\text{ПВ}}$ предусматривается N -кратное моделирование процесса проведения ТО.

При этом количество реализаций алгоритма определяется относительной погрешностью результатов $\varepsilon_{\text{ТР}}$ при заданной доверительной вероятности α и дисперсией оцениваемых величин [7–9].

Одна реализация алгоритма заключается в моделировании с помощью случайных чисел длительностей отдельных операций ТО (табл. 2) и оценке их эффективности. Считается, что если общее время ТО τ_{Π} в i -й реализации не превосходит отводимого T_{Π} , то все неисправности, накопленные к началу ТО, в данной реализации выявляются.

В блок-схеме алгоритма приняты следующие обозначения:

N_p – количество реализаций алгоритма;

ξ – случайное число, равномерно распределенное в интервале (0,1);

P_{Π} – статистическая оценка вероятности того, что в процессе регулировок и подстроек удастся установить исходные значения контролируемых параметров и не требуется проводить поиск и устранение неисправности;

$P_{\text{ВО}}$ – статистическая оценка вероятности выявления неисправности при проведении внешнего осмотра;

τ_{Π} – общая продолжительность ТО в i -й реализации;

$n_{\Pi\text{В}}^{(\Pi)}$, $n_{\Pi\text{В}}^{(\text{C})}$ – количество неисправностей, выявленных при полном и сокращенном ТО соответственно;

$\sum \tau_p$ – счетчик числа реализаций, в которых общее время ТО τ_{Π} не превосходит отводимого T_{Π} ;

$\sum \tau_{\Pi}$ – счетчик суммарного времени простоя аппаратуры на ТО в N_p реализациях [10–12].

Результатами решения задачи являются следующие величины:

1. Статистическая оценка вероятности выявления неисправностей:

$$P_{\Pi\text{В}}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} r_{pi}}{N_p} \frac{n_{\Pi\text{В}}}{n_{\Pi}}, \quad (4)$$

где r_{pi} в i -й реализации принимает значение 0 и 1.

2. Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение длительности проведения ТО:

$$T_{\Pi 0}^* = M^*[\tau_{\Pi}] = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \tau_{\Pi i}}{N_p}, \quad (5)$$

$$\sigma^*[\tau_{\Pi}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (\tau_{\Pi i} - T_{\Pi 0}^*)^2}{N_p - 1}}. \quad (6)$$

3. Гистограмма случайной величины τ_{Π} – длительности ТО:

$$p_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} r_{ij}}{N_p} \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (7)$$

где p_i^* – частота, соответствующая i -му разряду гистограммы; k – количество разрядов гистограммы;

$\sum_{i=1}^{N_p} r_{ij}$ – счетчик числа попаданий случайной величины τ_{Π} в i -й разряд.

Для реализации рассмотренного алгоритма необходимо задать численные значения следующих исходных данных:

– математического ожидания и среднеквадратического отклонения длительностей выполнения отдельных операций (вспомогательных T_{BC} , σ_{BC} ; регулировок и подстроек T_{RP} , σ_{RP} ; устранения неисправностей T_y , σ_y ; внешнего осмотра, чистки, смазки T_{BO} , σ_{BO});

– среднего времени поиска неисправности $\left(T_{\Pi\Pi} = \frac{1}{v_{\Pi\Pi}} \right)$;

– T_{Π} (время ТО);

– P_{RP} и P_{BO} ;

– среднего количества неисправностей, устраняемых при проведении сокращенного и полного ТО ($n_{\Pi\Pi}^{(C)}$ и $n_{\Pi\Pi}^{(\Pi)}$);

– требуемой погрешности результатов (ε_{TP}) и величины t_{α} .

Величину ε можно оценить по соотношению:

$$\varepsilon = 2t_{\alpha} \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_p} x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{N_p} x_i \right)^2} - \frac{1}{N_p} \right) * \frac{N_p}{N_p - 1}}; \quad (8)$$

– требуемого количества реализаций алгоритма ($N_{p\ TP}$) [13–15].

Пример оценки вероятности выявления неисправностей при проведении ТО

При проведении опытной эксплуатации определены параметры ТО:

1) по результатам хронометрирования отдельных операций ТО:

– математические ожидания и среднеквадратические отклонения времени выполнения вспомогательных операций $T_{BC} = 0,2$ час, $\sigma_{BC} = 0,07$ час; регулировок и подстроек $T_{RP} = 0,15$ час, $\sigma_{RP} = 0,05$ час; устранения неисправностей $T_y = 0,1$ час, $\sigma_y = 0,04$ час; внешнего осмотра $T_{BO} = 1,0$ час; $\sigma_{BO} = 0,3$ час;

– среднее время поиска неисправностей $T_{\Pi\Pi} = 0,5$ час;

2) результатам обработки статистических данных по оценке эффективности отдельных операций ТО:

– эффективность предусмотренных в аппаратуре регулировок и подстроек. Оценивается соотношением: $P_{RP} = \frac{n_{RP}^{(+)}}{n_{RP}^{(+)} + n_{RP}^{(-)}}$, где $n_{RP}^{(+)}$ – число неисправностей, устраненных за счет регулировок и подстроек; $n_{RP}^{(-)}$ – число неисправностей, которое не удалось устранить регулировками, $P_{RP} = 0,3$;

– эффективность обслуживания при проведении внешнего осмотра. Оценивается соотношением $P_{BO} = \frac{n_{BO}^{(+)}}{n_{BO}^{(+)} + n_{BO}^{(-)}}$, где $n_{BO}^{(+)}$ и $n_{BO}^{(-)}$ – число неисправностей, выявленных и пропущенных при осмотре соответственно, $P_{BO} = 0,2$.

Подконтрольная эксплуатация проводилась для двух видов ТО: полного и сокращенного. Среднее количество неисправностей, выявленных при проведении полного и сокращенного ТО соответственно равны $n_{\Pi\Pi}^{(\Pi)} = 12$; $n_{\Pi\Pi}^{(C)} = 5$.

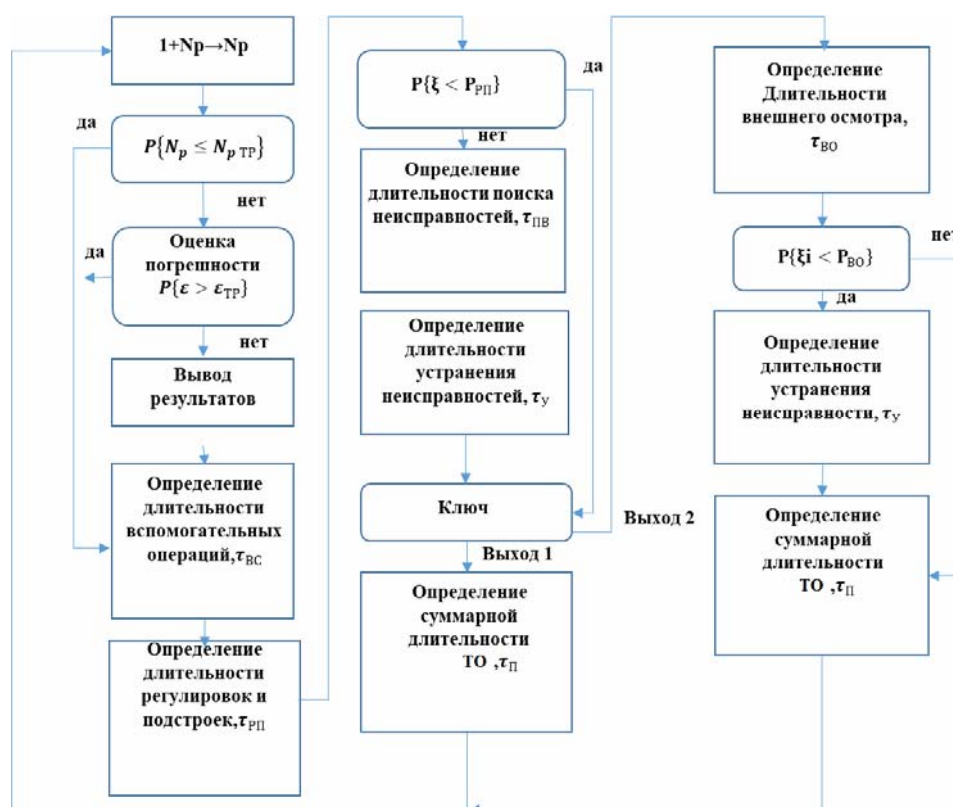


Рис. 1. Блок-схема алгоритма для оценки процесса выявления неисправностей при техническом обслуживании

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for evaluating the process of troubleshooting during maintenance

Проанализировать возможность сокращения времени простоя на ТО без существенного снижения эффективности ТО, значит:

- оценить эффективность ТО в зависимости от вида;
- оценить эффективность ТО при проведении его в ограниченное время ($T_{\Pi} \leq 1$ час).

Для решения указанных вопросов необходимо оценить значение $P_{\Pi\text{в}}$ при изменении времени, отводимого на техническое обслуживание T_{Π} , для случаев полного и сокращенного ТО.

Поставленная задача решена с помощью разработанного алгоритма при следующих исходных данных: $N_{\text{ртр}} = 200$; $\varepsilon_{\text{тр}} = 0,1$; $t_{\alpha} = 1,96$.

Рассмотрим полученные результаты.

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости $P_{\Pi\text{в}}^*$ от времени T_{Π} , отводимого на ТО, и среднего времени их поиска.

Анализ графиков на рис. 2 и 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальное значение $P_{\Pi\text{в}}^*$ достигается при проведении полного ТО при условии, что на проведение ТО отводится не менее $T_{\Pi} = 2$ ч ($P_{\Pi\text{в}}^* \geq 0,98$).

2. Проведение ТО по сокращенному графику нецелесообразно ($P_{\Pi\text{в}}^* \leq 0,46$). Однако при условии ограниченного времени проведения технического обслуживания ($T_{\Pi} = 1$ час) лучше проводить сокращенное ТО, так как при этом $P_{\Pi\text{в}}^* = 0,3$, а при полном ТО $P_{\Pi\text{в}}^* = 0,1$.

Рассмотренный алгоритм является составным элементом программно-методического комплекса (ПМК) с пользовательским интерфейсом, реализованным в среде Matlab [16]. ПМК позво-

ляет прогнозировать параметры технического обслуживания для агрегатов и элементов ЛА с различными системами технического обслуживания и проводить оптимизацию этих параметров с целью увеличения коэффициента готовности ЛА. При практическом использовании ПМК для агрегатов и узлов ЛА с комплексной моделью технического обслуживания путем оптимизации параметров системы ТО удалось увеличить значение коэффициента готовности на 2,41 % [17].

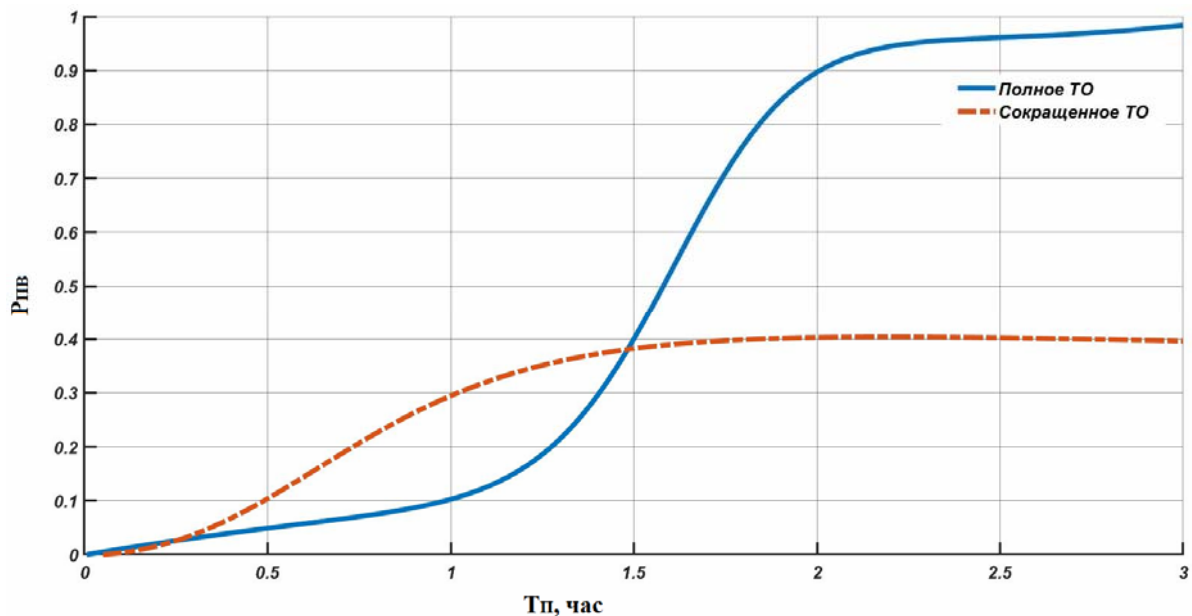


Рис. 2. Графики зависимости вероятности выявления неисправностей от времени, отводимого на ТО

Fig. 2. Graphs of the dependence of the probability of detecting faults on the time allocated for maintenance

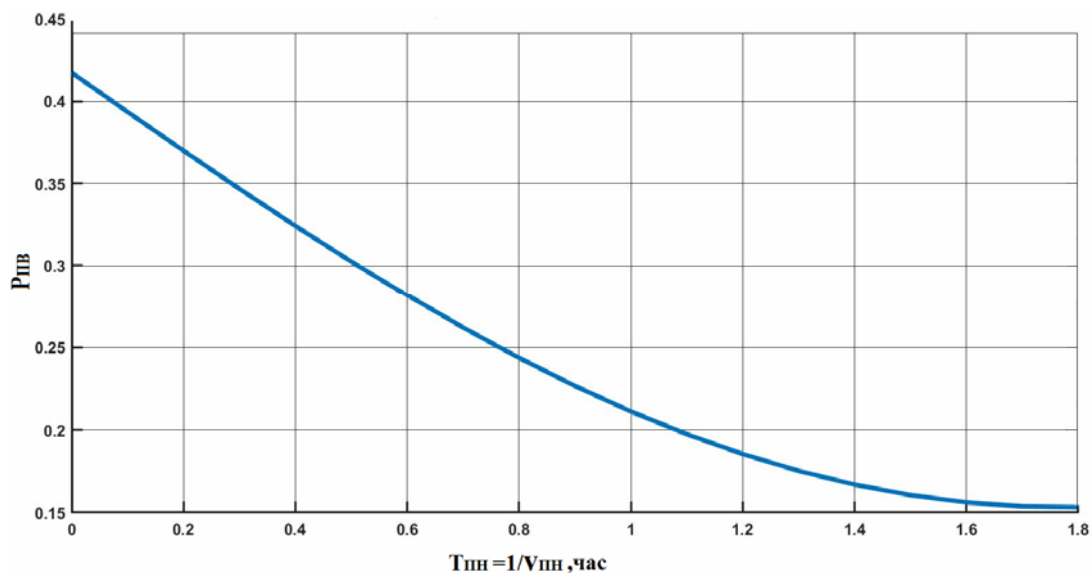


Рис. 3. График зависимости вероятности выявления неисправностей от среднего времени их поиска

Fig. 3. Graph of the dependence of the probability of detecting faults on the average time of their search

Заключение

При проведении ТО в течение ограниченного времени $T_{п} \leq 1$ час необходимо предусматривать специальные методы сокращения времени поиска неисправностей (системы поиска неисправностей).

правный элементов, повышение квалификации обслуживающего персонала). При этом сокращение времени с $T_{\text{пн}} = 0,5$ ч до $T_{\text{пн}} = 0,1$ ч повышает вероятность выявления неисправностей в 1,5 раза и сокращает простой на ТО в среднем в 2 раза.

Таким образом, из результатов проведённого расчета очевидно, что для рассмотренной системы технического обслуживания нельзя сократить время простоя на ТО без существенного снижения качества восстановления.

Библиографические ссылки

1. Миронычев В. П. Методы и способы поиска неисправностей в радиоэлектронных системах // Вологодские чтения. 2009. № 73. С. 74–77.
2. Надежность технических систем / Е. В. Сугак и др. Красноярск : НИИ СУВПТ, МГП «Раско», 2001. 608 с.
3. Ксендз С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. М. : Радио и связь, 1989. 248 с.
4. Выявление причин отказов РЭА / под ред. Л. Г. Дубицкого. М. : Радио и связь, 1983. 232 с.
5. Дмитриевский Е. С. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надежности авиационного радиоэлектронного оборудования. СПб., 2001. 88 с.
6. Патраев В. Е., Шангина Е. А. Надежность технических систем космических аппаратов / Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. Красноярск : СФУ, 2019. 64 с.
7. Патраев В. Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования : монография. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 136 с.
8. Золотов А. А., Нурулаев Э. Д. Методы повышения эффективности контроля агрегатов изделений ракетно-космической техники // Вестник МАИ. 2015. Т. 22, № 4. С. 46–52.
9. Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем / А. Г. Галлеев и др. М. : Изд-во МАИ, 2007. 260 с.
10. Гусев Е. В., Золотов А. А., Родченко В. В. Методика оптимизации параметров технического обслуживания и показателей безотказности сложных технических систем, функционирующих на кислородно-водородном топливе // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 1-3. С. 22–33.
11. Эксплуатация радиотехнических комплексов / А. И. Александров и др. М. : Советское радио, 1976. 280 с.
12. Гусев Е. В., Золотов А. А., Родченко В. В. Прогнозирование показателей технического обслуживания сложных технических систем // Полет. 2021. № 8. С. 37–44.
13. Fitch E. S. Proactive maintenance for machanical system. Amsterdam: Elsevier Science, 2013. 339 p.
14. Panday B. K. Failure Spase X Falcon 9 // Sps-aviation. Aug 2015. P. 10–12.
15. Никушкин Н. В., Кацура А. В. Решение задачи моделирования систем технического обслуживания летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2006. № 4(11). С. 46–49.
16. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ 2021619616 Российская Федерация. Программа расчета параметров системы технического обслуживания / Е. В. Гусев ; заявитель и правообладатель Гусев Е. В. №2021618549; заявл. 02.07.2021; опубл. 15.07.2021.
17. Гусев Е. В. Разработка программного комплекса для прогнозирования параметров технического обслуживания сложных систем // Перспективы науки. 2021, № 7(142). С. 31–35.

References

1. Mironychev V. P. [Methods and methods of troubleshooting in radio electronic systems]. *Vologdinskie chteniya*. 2009, No. 73, P. 74–77 (In Russ.).

2. Sugak E. V. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, NII SUVPT, MGP Rasko Publ., 2001, 608 p.
3. Ksendz S. P. *Diagnostika i remontoprigradnost' radioelektronnykh sredstv* [Diagnostics and maintainability of radio-electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989, 248 p.
4. *Vyyavlenie prichin otkazov REA* [Revealing the causes of REE failures]. Ed. L. G. Dubitsky, Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983, 232 p.
5. Dmitrievsky E. S. *Konstruktorско-tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya* [Design and technological support for the operational reliability of aviation radio-electronic equipment]. St. Petersburg, 2001, 88 p.
6. Patraev V. E., Shangina E. A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Reliability of technical systems of spacecraft: a tutorial]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2019, 64 p.
7. Patraev V. E. *Metody obespecheniya i otsenki nadezhnosti kosmicheskikh apparatov s dlitel'nyim srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [Methods for ensuring and assessing the reliability of spacecraft with a long active life]. Krasnoyarsk, Sib. state aerospace un-t Publ., 2010, 136 p.
8. Zolotov A. A., Nurulaev E. D. [Methods for increasing the efficiency of control of units of rocket and space technology]. *Vestnik MAI*. 2015, Vol. 22, No. 4, P. 46–52 (In Russ.).
9. Galleev A. G., Zolotov A. A., Perminov A. N., Rodchenko V. V. *Ekspluatatsiya ispytatel'nykh kompleksov raketno-kosmicheskikh sistem* [Operation of test complexes of rocket-space systems]. Moscow, MAI Publ., 2007, 260 p.
10. Gusev E. V., Zolotov A. A., Rodchenko V. V. [Technique for optimization of maintenance parameters and reliability indicators of complex technical systems operating on oxygen-hydrogen fuel]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2017, No. 1–3, P. 22–33 (In Russ.).
11. Aleksandrov A. I. et al. *Ekspluatatsiya radiotekhnicheskikh kompleksov* [Operation of radio engineering complexes]. Moscow, Soviet radio Publ., 1976, 280 p.
12. Gusev E. V., Zolotov A. A., Rodchenko V. V. [Forecasting indicators of maintenance of complex technical systems]. *Polet*. 2021, No. 8, P. 37–44 (In Russ.).
13. Fitch E. S. Proactive maintenance for machanical system. Amsterdam: Elsevier Science, 2013, 339 p.
14. Panday B. K. Failure Spase X Falcon 9. Sps-aviation, 2015, p. 10–12.
15. Nikushkin N. V., Katsura A. V. [Solution of the problem of modeling aircraft maintenance systems]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 4 (11), P. 46–49 (In Russ.).
16. Gusev E. V. *Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM 2021619616 Rossiyskaya Federatsiya. Programma rascheta parametrov sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya* [Certificate of state registration of a computer program 2021619616 Russian Federation. Program for calculating the parameters of the maintenance system]. No. 2021618549; app. 07/02/2021; publ. 07.15.2021.
17. Gusev E. V. [Development of a software package for predicting the parameters of maintenance of complex systems]. *Perspektivy nauki*. 2021, No. 7 (142), P. 31–35 (In Russ.).

© Гусев Е. В., Родченко В. В., 2021

Родченко Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт. E-mail: rodchenko47@mail.ru.

Гусев Евгений Владимирович – старший преподаватель кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт. E-mail: ccg-gus@mail.ru.

Rodchenko Vladimir Viktorovich – Dr. Sc., Professor of the Department. 610 Operational management of rocket and space systems; Moscow Aviation Institute. E-mail: rodchenko47@mail.ru.

Gusev Evgeny Vladimirovich – senior lecturer of the department. 610 Management of the operation of rocket and space systems; Moscow Aviation Institute. E-mail: ccg-gus@mail.ru.
