

EVALUATION AND IMPROVEMENT OF THE ACCURACY OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF AN AIRCRAFT ENGINE WHEN MONITORING ITS TECHNICAL CONDITION DURING OPERATION

V. A. Zagorsky ^{1a}, M. V. Blednykh ^{1b}, D. V. Blednykh ^{2c}

¹ Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy"

² Voronezh State Technical University (VSTU)

^a z_t58@mail.ru, ^b blednyhmihail84@gmail.com, ^c albinarushanovna@icloud.com

Submitted 2022, April 8

Abstract. The article analyzes the results of evaluating the accuracy of determining the characteristics of an aircraft engine when monitoring its technical condition during operation. The author's method of determining the accuracy of the operation execution time is proposed, which is based on the general theory of measurements and mathematical statistics. The use of the methodology will improve the accuracy of determining the time of operations when monitoring the technical condition of an aircraft engine during operation.

Keywords: aircraft engine; operation execution time; technical condition control; mathematical expectation; average interval value; total value; distribution density.

ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. А. Загорский ^{1a}, М. В. Бледных ^{1b}, Д. В. Бледных ^{2b}

¹ ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ)

^a z_t58@mail.ru, ^b blednyhmihail84@gmail.com, ^c albinarushanovna@icloud.com

Поступила в редакцию 8.04.2022

Аннотация. Проведен анализ результатов оценки точности определения характеристик авиационного двигателя при контроле его технического состояния в процессе эксплуатации. Предложена авторская методика определения точности времени выполнения операции, которая основывается на общей теории измерений и математической статистике. Использование методики позволит повысить точность определения времени выполнения операций при контроле технического состояния авиационного двигателя в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: авиационный двигатель; время выполнения операции; контроль технического состояния; математическое ожидание; среднее интервальное значение; суммарная величина; плотность распределения.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении одной и той же операции в ходе контроля технического состояния авиационного двигателя (ТС АД) в процессе эксплуатации требуется разное время. Следовательно, можно считать, что время выполнения операции в ходе контроля ТС АД в процессе эксплуатации является случайной величиной.

Для удобства анализа функцию плотности распределения времени выполнения операции при нормальном симметричном распределении и все соответствующие ей величины обозначим индексом «I», а именно $\tau_{\mu I}$ – математическое ожидание времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД; $\tau_{\text{ном I}}$ – номинальное значение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД (рис. 1).

В случае нормального симметричного распределения плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_I$ в интервале $\tau_{\text{мин}} \dots \tau_{\text{макс}}$ (рис. 1), за время выполнения операции можно принять:

1. Математическое ожидание времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\mu I}$.
2. Среднее интервальное значение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\text{ср I}}$.
3. Суммарную величину времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\Sigma I}$, определенную как сумма математического ожидания и смещенного среднеквадратичного отклонения:

$$\tau_{\Sigma I} = \tau_{\mu I} + \sigma_{\text{ср I}} \quad (1)$$

4. Суммарную величину времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\Sigma I}$, определенную как сумма математического ожидания и несмещенного среднеквадратичного отклонения:

$$\tau_{\Sigma I} = \tau_{\mu I} + \sigma_{\text{ср I}} \quad (2)$$

5. Максимальную величину времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\text{макс I}}$.

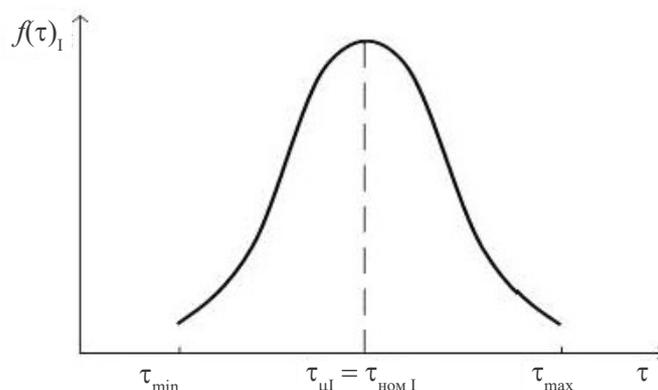


Рис. 1. Нормальное симметричное распределение функции плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_I$ при условии $\tau_{\mu I} = \tau_{\text{ном I}}$

Вариант 2 «среднее интервальное значение» при определенных условиях может быть использован для оценки неопределенности измерений времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД как параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине [1].

Варианты 3 «сумма математического ожидания и смещенного среднеквадратичного отклонения» и 5 «максимальная величина времени выполнения операции» также отпадают, поскольку нам необходимо выполнить оценку точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД.

Вариант 4 «сумма математического ожидания и несмещенного среднеквадратичного отклонения» в данном случае не подходит, поскольку речь идет о генеральной выборке зависимых случайных величин, так как рассматривается конкретная операция в ходе контроля ТС АД, выполняемая по конкретной технологической карте.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 [2] «точность – это степень близости результата измерений к принятому опорному значению». Поэтому для оценки точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД нам следует выбрать опорное значение этой величины. В ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 сказано, что принятое опорное значение – это значение, которое служит в качестве согласованного для сравнения и получено как:

- а) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;
- б) приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;
- в) согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы;
- г) математическое ожидание (общее среднее значение) заданной совокупности результатов измерений.

В нашем случае принятому опорному значению соответствует только вариант 1 «математическое ожидание времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_{μ} ».

Таким образом, из рассмотренных 5-ти вариантов за номинальное (опорное) значение $\tau_{\text{ном}}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД принимаем математическое ожидание времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД.

Под номинальным значением параметра понимается значение параметра, определенное его функциональным назначением и служащее началом отсчета отклонений [1].

После оценки точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД, эта величина будет считаться действительным значением времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_d , поскольку действительное значение параметра – это значение параметра, которое измеряется только с определенной погрешностью [1].

Для оценки точности определения действительного значения величины времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_d нам необходимо определить ее измеренное отклонение от номинальной величины $\Delta\tau_d$ и ее относительное измеренное отклонение от номинальной величины $\delta\tau_d$.

Измеренное отклонение параметра (абсолютная погрешность) – это алгебраическая разность между измеренным и номинальным значением параметра [1]:

$$\Delta\tau_d = \tau_{\text{ном}} - \tau_i. \quad (3)$$

В данной формуле τ_i – текущее измеренное значение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД. Величины τ_i будем считать равноточными. Равноточным называется ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью. Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными [1].

Относительное отклонение параметра (относительная погрешность) – это измеренное отклонение значения параметра, выраженное в процентах относительно верхнего или нижнего допуска параметра [3].

В выбранном интервале изменения измеренного текущего значения времени τ_i выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\text{min}} \dots \tau_{\text{max}}$:

– нижним допуском времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_{min} является величина $\tau_{\text{min}} = \tau_{\text{ном}} - 0,1 \cdot \tau_{\text{ном}}$;

– верхним допуском времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_{\max} является величина $\tau_{\max} = \tau_{\text{ном}} + 0,1 \cdot \tau_{\text{ном}}$.

При отклонении измеренных значений τ_i времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД от его номинального значения для расчетов величины относительной погрешности $\delta\tau_d$ будем использовать следующие выражения:

- при $\tau_i < \tau_{\text{ном}}$: $\delta\tau_d = \Delta\tau_d / \tau_{\min} = (\tau_{\text{ном}} - \tau_i) / \tau_{\min}$;
- при $\tau_i > \tau_{\text{ном}}$: $\delta\tau_d = \Delta\tau_d / \tau_{\max} = (\tau_i - \tau_{\text{ном}}) / \tau_{\max}$.

Нормальному симметричному распределению плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_I$ при условии $\tau_{\mu I} = \tau_{\text{ном I}}$ при выбранных значениях τ_i соответствует табл. 1.

Таблица 1. Измеренные значения τ_i , определенные при расчетах при условии $\tau_{\mu I} = \tau_{\text{ном I}}$

Время операций	$\tau_1 = \tau_{\min}$	τ_2	τ_3	τ_4	$\tau_5 = \tau_{\max}$	$\tau_{\mu I}$
	9 мин	9,5 мин	10 мин	10,5 мин	11 мин	10 мин
Время операций	$\tau_{\text{ном I}}$	$\sigma_{\text{тср I}}$	$\delta\tau_{d \text{ ср} < I}$	$\delta\tau_{d \text{ ср} > I}$	$\delta\tau_{d \text{ min I}}$	$\delta\tau_{d \text{ max I}}$
	10 мин	0,707 мин	7,86 %	6,43 %	9,09 %	11,11 %

Математическое ожидание (наиболее вероятное значение) $\tau_{\mu I}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим, как среднее арифметическое значение текущих значений времени τ_i :

$$\tau_{\mu I} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5}{n} = \frac{9 + 9,5 + 10 + 10,5 + 11}{5} = 10 \text{ мин.} \quad (4)$$

$\tau_{\text{ном I}} = \tau_{\mu I} = 10$ мин. Смещенное значение среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\text{тср I}}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{тср I}} &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\tau_{\text{ср}} - \tau_i)^2}{n} \right)^{0,5} = \left(\frac{(10 - 9)^2 + (10 - 9,5)^2 + (10 - 10)^2 + (10 - 10,5)^2 + (10 - 11)^2}{5} \right)^{0,5} = \\ &= \left(\frac{(1 + 0,25 + 0 + 0,25 + 1)}{5} \right)^{0,5} = \left(\frac{2,5}{5} \right)^{0,5} = 0,707 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (5)$$

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i < \tau_{\text{ном}}$ определим, как:

$$\delta\tau_{d \text{ ср} < I} = \Delta\tau_{d < I} / \tau_{\min I} \quad (6)$$

где $\Delta\tau_{d > I} = (\tau_{i > I} - \tau_{\text{ном I}}) = \sigma_{\text{тср I}} = 0,707$ мин.

Тогда $\delta\tau_{d \text{ ср} < I} = \sigma_{\text{тср I}} / \tau_{\min I} = 0,707/9 = 0,0786 = 7,86 \%$.

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i > \tau_{\text{ном}}$ определим, как:

$$\delta\tau_{d \text{ ср} > I} = \Delta\tau_{d > I} / \tau_{\max I}, \quad (7)$$

где $\Delta\tau_{d > I} = (\tau_{i > I} - \tau_{\text{ном I}}) = \sigma_{\text{тср I}} = 0,707$ мин.

Тогда $\delta\tau_{d \text{ ср} > I} = \sigma_{\text{тср I}} / \tau_{\max I} = 0,707/11 = 0,0643 = 6,43 \%$.

Запишем данные значения в табл. 1.

Минимальное значение относительной погрешности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i > \tau_{\text{ном}}$ определим, как:

$$\delta\tau_{\text{д min I}} = \Delta\tau_{\text{д > I}} / \tau_{\text{max}}, \quad (8)$$

где $\delta\tau_{\text{д > I}} = (\tau_{i \text{ max}} - \tau_{\text{ном}}) = 11 - 10 = 1$ мин.

Тогда $\delta\tau_{\text{д min I}} = 1/11 = 0,0909 = 9,09$ %.

Максимальное значение относительной погрешности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i < \tau_{\text{ном}}$ определим, как:

$$\delta\tau_{\text{д max I}} = \Delta\tau_{\text{д < I}} / \tau_{\text{min}}, \quad (9)$$

где $\delta\tau_{\text{д < I}} = (\tau_{\text{ном I}} - \tau_{\text{min}}) = (10 - 9) = 1$ мин.

Тогда $\delta\tau_{\text{д max I}} = 1/9 = 0,1111 = 11,11$ %.

Полученные значения средних, минимальной и максимальной относительной погрешностей свидетельствуют о низкой точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД. Низкая точность определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД объясняется слишком широким интервалом изменения измеренных текущих значений τ_i в пределах $\tau_{\text{min}} = \tau_{\text{ном}} - 0,1 \cdot \tau_{\text{min}} \dots \tau_{\text{max}} = \tau_{\text{ном}} + 0,1 \cdot \tau_{\text{ном}}$. Очевидно, что изменение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД в пределах $\pm 0,1 \cdot \tau_{\text{ном}}$ не удовлетворяет современным требованиям.

Нормальное симметричное распределения плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД, представленное на рис. 1, имеет место в случае, когда устранены систематические погрешности и изменение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_i в пределах интервала $\tau_{\text{min}} \dots \tau_{\text{max}}$ обусловлено только наличием случайных погрешностей при определении τ_i . На практике часто имеют место неустраненные систематические погрешности (НСП) и тогда изменение времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_i в пределах интервала $\tau_{\text{min}} \dots \tau_{\text{max}}$ обусловлено суммой случайных погрешностей и неустраненных систематических погрешностей. В таких случаях вместо нормального симметричного распределения функции плотности распределения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД приходится иметь дело с несимметричными смещенными распределениями времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД.

Для удобства анализа смещенные несимметричные распределения функций плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД и все соответствующие им величины обозначим соответственно индексами «II» и «III».

Рассмотрим возможность повышения точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД на примере несимметричных смещенных распределений.

При наложении друг на друга графиков будем иметь кривые, представленные на рис. 2. Наложение графиков показывает нам, как устранение систематических погрешностей влияет на вид «условных функций» плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{\text{II}}$ и $f(\tau)_{\text{III}}$. В данном случае применен термин «условные функции», поскольку они будут иметь вид рис. 2 при условии, что неустраненные систематические погрешности присутствовали при определении значений математических ожиданий времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $\tau_{\mu \text{ II}}$ и $\tau_{\mu \text{ III}}$.

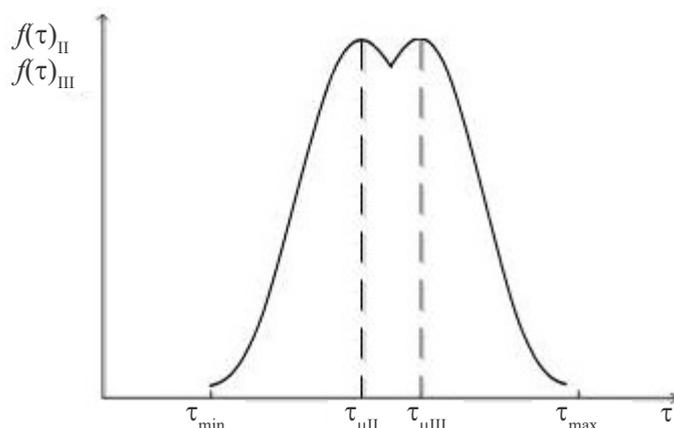


Рис. 2. Совместное расположение кривых условных функций плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{II}$ и $f(\tau)_{III}$ при устранении систематических погрешностей

Если устранить систематические погрешности и сократить интервал изменения измеренных текущих значений τ_i времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД для каждой функции $f(\tau)_{II}$ и $f(\tau)_{III}$ в 2 раза, то кривые модифицированных функций плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{m II}$ и $f(\tau)_{m III}$ будут иметь вид, приведенный на рис. 3.

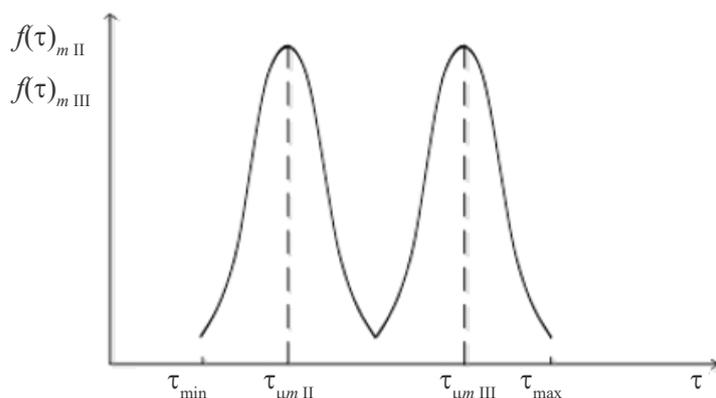


Рис. 3. Совместное расположение кривых модифицированных функций плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{m II}$ и $f(\tau)_{m III}$ при устранении систематических погрешностей и сокращении интервала изменения измеренных текущих значений τ_i для каждой функции в 2 раза

Как видно из графиков рис. 3, модифицированные функции плотностей времени выполнения операции ТО АД $f(\tau)_{m II}$ и $f(\tau)_{m III}$ представляют нормальные симметричные распределения плотностей времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД.

Нормальному симметричному распределению плотности условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД модифицированной функции $f(\tau)_{m II}$ соответствует табл. 2.

Таблица 2. Измеренные текущие значения t_i и значения, определенные при расчетах для модифицированной функции плотности условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(t)_{m II}$

Время операций	$\tau_1 = \tau_{\min}$	τ_2	τ_3	τ_4	$\tau_5 = \tau_{\max}$	$\tau_{\mu m II}$
	9 мин	9,25 мин	9,5 мин	9,75 мин	10 мин	9,5 мин
Время операций	$\tau_{\text{ном } m II}$	$\sigma_{\text{ср } m II}$	$\delta\tau_{\text{д ср } m < II}$	$\delta\tau_{\text{д ср } m > II}$	$\delta\tau_{\text{д min } m II}$	$\delta\tau_{\text{д max } m II}$
	9,5 мин	0,354 мин	3,93 %	3,54 %	5,0 %	5,56 %

Математическое ожидание (наиболее вероятное значение) $\tau_{\mu m \Pi}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим, как среднее арифметическое значение текущих значений времени τ_i из табл. 2:

$$\tau_{\mu m \Pi} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5}{n} = \frac{9 + 9,25 + 9,5 + 9,75 + 10}{5} = 9,5 \text{ мин.} \quad (10)$$

$\tau_{\text{ном } m \Pi} = \tau_{\mu m \Pi} = 9,5$ мин. Смещенное значение среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi} &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\tau_{\text{ср}} - \tau_i)^2}{n} \right)^{0,5} = \left(\frac{(9,5 - 9)^2 + (9,5 - 9,25)^2 + (9,5 - 9,5)^2 + (9,5 - 9,75)^2 + (9,7 - 10)^2}{5} \right)^{0,5} = \\ &= \left(\frac{0,25 + 0,0625 + 0 + 0,0625 + 0,25}{5} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,625}{5} \right)^{0,5} = 0,354 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (11)$$

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i < \tau_{\text{ном } m \Pi}$ определим, как:

$$\delta\tau_{\text{д ср } m < \Pi} = \frac{\Delta\tau_{\text{д } m < \Pi}}{\tau_{\text{мин } m \Pi}}, \quad (12)$$

где $\Delta\tau_{\text{д } m < \Pi} = (\tau_{\text{ном } m \Pi} - \tau_{i m < \Pi}) = \sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi} = 0,354$ мин.

$$\text{Тогда } \delta\tau_{\text{д ср } m < \Pi} = \frac{\sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi}}{\tau_{\text{мин } m \Pi}} = 0,354/9 = 0,0393 = 3,93 \text{ \%}.$$

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m > \Pi} > \tau_{\text{ном } m \Pi}$ определим, как:

$$\delta\tau_{\text{д ср } m > \Pi} = \frac{\Delta\tau_{\text{д } m > \Pi}}{\tau_{\text{макс } m \Pi}}, \quad (13)$$

где $\Delta\tau_{\text{д } m > \Pi} = (\tau_{\text{ном } m \Pi} - \tau_{i m < \Pi}) = \sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi} = 0,354$ мин.

$$\text{Тогда } \delta\tau_{\text{д ср } m > \Pi} = \frac{\sigma_{\tau \text{ ср } m \Pi}}{\tau_{\text{макс } m \Pi}} = 0,354/10 = 0,0354 = 3,54 \text{ \%}.$$

Запишем данные значения в табл. 2.

Минимальное значение относительной погрешности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m > \Pi} > \tau_{\text{ном } m \Pi}$ определим, как:

$$\delta\tau_{\text{д мин } m \Pi} = \frac{\Delta\tau_{\text{д } m > \Pi}}{\tau_{\text{мин } m \Pi}}, \quad (14)$$

где $\Delta\tau_{\text{д } m > \Pi} = (\tau_{\text{макс } m \Pi} - \tau_{\text{ном } m \Pi}) = 10 - 9,5 = 0,5$ мин.

$$\text{Тогда } \delta\tau_{\text{д мин } m \Pi} = 0,5/10 = 0,05 = 5,0 \text{ \%}.$$

Максимальное значение относительной погрешности (минимальная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_i < \tau_{\text{ном } m \Pi}$ определим, как:

$$\delta\tau_{д\max m II} = \frac{\Delta\tau_{д m < II}}{\tau_{\min m II}}, \quad (15)$$

где $\Delta\tau_{д m < II} = (\tau_{\text{ном } m II} - \tau_{\min m II}) = (9,5 - 9) = 0,5$ мин.

Тогда $\delta\tau_{д\max m II} = 0,5/9 = 0,556 = 5,56$ %.

Нормальному симметричному распределению плотности условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД модифицированной функции $f(\tau)_{m III}$ соответствует табл. 3.

Таблица 3. Измеренные равноточные текущие значения τ_i и значения, определенные при расчетах для модифицированной функции плотности условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{m III}$

Время операций	$\tau_i = \tau_{\min}$	τ_2	τ_3	τ_4	$\tau_5 = \tau_{\max}$	$\tau_{\mu m III}$
	10 мин	10,25 мин	10,5 мин	10,75 мин	11 мин	10,5 мин
Время операций	$\tau_{\text{ном } m III}$	$\sigma_{\tau\text{ср } m III}$	$\delta\tau_{д\text{ср } m < III}$	$\delta\tau_{д\text{ср } m > III}$	$\delta\tau_{д\text{мин } m III}$	$\delta\tau_{д\text{макс } m III}$
	10,5 мин	0,354 мин	3,54 %	3,22 %	4,55 %	5,0 %

Математическое ожидание (наиболее вероятное значение) $\tau_{\mu m II}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим, как среднее арифметическое значение текущих значений времени τ_i из табл. 3:

$$\tau_{\mu m II} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5}{n} = \frac{9 + 9,25 + 9,5 + 9,75 + 10}{5} = 9,5 \text{ мин.} \quad (16)$$

$\tau_{\text{ном } m III} = \tau_{\mu m III} = 10,5$ мин. Смещенное значение среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\tau\text{ср } m III}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД определим по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau\text{ср } m III} &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\tau_{\text{ср}} - \tau_i)^2}{n} \right)^{0,5} = \left(\frac{(9,5 - 9)^2 + (9,5 - 9,25)^2 + (9,5 - 9,5)^2 + (9,5 - 9,75)^2 + (9,7 - 10)^2}{5} \right)^{0,5} = \\ &= \left(\frac{0,25 + 0,0625 + 0 + 0,0625 + 0,25}{5} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,625}{5} \right)^{0,5} = 0,354 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (17)$$

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m III} < \tau_{\text{ном } m III}$ определим, как:

$$\delta\tau_{д\text{ср } m < III} = \frac{\Delta\tau_{д m < III}}{\tau_{\min m III}}, \quad (18)$$

где $\Delta\tau_{д m < III} = (\tau_{\text{ном } m III} - \tau_{i m < III}) = \sigma_{\tau\text{ср } m III} = 0,354$ мин.

Тогда $\delta\tau_{д\text{ср } m < III} = \frac{\sigma_{\tau\text{ср } m III}}{\tau_{\min m III}} = 0,354/10 = 0,0354 = 3,54$ %.

Математическое ожидание относительной погрешности (средняя относительная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m > III} > \tau_{\text{ном } m III}$ определим, как:

$$\delta\tau_{д\text{ср } m > III} = \frac{\Delta\tau_{д m > III}}{\tau_{\max m III}}, \quad (19)$$

где $\Delta\tau_{д m < III} = (\tau_{ном m III} - \tau_{i m < III}) = \sigma_{\tau ср m III} = 0,354$ мин.

Тогда $\delta\tau_{д ср m > III} = \frac{\sigma_{\tau ср m III}}{\tau_{max m II}} = 0,354/11 = 0,0322 = 3,22$ %.

Запишем данные значения в табл. 3.

Минимальное значение относительной погрешности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m > III} > \tau_{ном m III}$ определим, как:

$$\delta\tau_{д min m III} = \frac{\Delta\tau_{д m > III}}{\tau_{max m III}}, \quad (20)$$

где $\Delta\tau_{д m > III} = (\tau_{max m III} - \tau_{ном m III}) = 11 - 10,5 = 0,5$ мин.

Тогда $\delta\tau_{д min m III} = 0,5/11 = 0,0455 = 4,55$ %.

Максимальное значение относительной погрешности (минимальная погрешность) определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при условии $\tau_{i m III} < \tau_{ном m III}$ определим, как:

$$\delta\tau_{д max m III} = \frac{\Delta\tau_{д m < III}}{\tau_{min m III}}, \quad (21)$$

где $\Delta\tau_{д m < III} = (\tau_{ном m III} - \tau_{min m III}) = (10,5 - 10) = 0,5$ мин.

Тогда $\delta\tau_{д max m III} = 0,5/10 = 0,5 = 5,0$ %.

ВЫВОДЫ

По результатам оценки точности определения величин времени выполнения операций в ходе контроля ТС АД можно сделать следующие выводы:

1. Нормальное симметричное распределение функции плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_I$ имеет место в случае ряда равноточных измерений при отсутствии НСП. При этом выполняется условие $\tau_{\mu} = \tau_{ном}$ и за номинальное (опорное) значение $\tau_{ном}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД принимается математическое ожидание времени выполнения этой операции τ_{μ} .

2. За действительное значение времени выполнения операции τ_d , принимается значение этого времени, которое определяется только с определенными погрешностями. Средней абсолютной погрешностью является смещенное значение среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\tau ср}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД. Средними относительными погрешностями являются смещенные значения среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\tau ср}$ времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД, выраженные в процентах от верхней и нижней границ интервала изменения величины текущего значения τ_i времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_{min} и τ_{max} .

3. Смещенные несимметричные распределения функций плотности времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД $f(\tau)_{II}$ и $f(\tau)_{III}$ возникают при неравноточных рядах измерений при наличии неустранимых систематических погрешностей. Для повышения точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД следует использовать равноточные ряды измерений с устраненными систематическими погрешностями. Устранение систематических погрешностей уменьшает суммарную погрешность и повышает точность определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД.

4. Дальнейшее повышение точности определения времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД возможно за счет уменьшения диапазона изменения текущего времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД τ_i . Это достигается путем уменьшения

интервала $\tau_{\min} \dots \tau_{\max}$. На примере графиков рис. 1 и 3, а также по данным соответствующих им табл. 1, 2 и 3 можно видеть, что использование равнооточных рядов измерений с устраненными систематическими погрешностями в совокупности с уменьшением величин интервалов $\tau_{\min} \dots \tau_{\max}$ в 2 раза позволяет снизить абсолютную погрешность определения условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД также в два раза. Средние, минимальные и максимальные значения относительных погрешностей определения условного времени выполнения операции в ходе контроля ТС АД при этом также снижаются в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **РМГ 29-2013 ГСИ.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения // Рекомендации по межгосударственной стандартизации (дата введения 01.01.2015). М.: Стандартиформ, 2014. 60 с. [*State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions*, (in Russian), Recommendations for interstate standardization 29-2013 State system for ensuring the uniformity of measurements, Moscow, Standartinform, 2014.]

2. **ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. М.: Стандартиформ, 2009. 45 с. [*Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions*, (in Russian), in Federal standart R ISO 5725-1-2002, Moscow, Standartinform, 2009.]

ОБ АВТОРАХ

ЗАГОРСКИЙ Владимир Алексеевич, проф. каф. «Эксплуатация авиационной техники» ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

БЛЕДНЫХ Михаил Владимирович, адъюнкт каф. «Эксплуатация авиационной техники» ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина».

БЛЕДНЫХ Данила Владимирович, студент каф. «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «ВГТУ».

ZAGORSKY, Vladimir Alekseevich, Prof., Dept. of "Operation Aviation Technology" of the Military Training and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy".

BLEDNYKH, Mikhail Vladimirovich, Postgrad., Dept. of "Operation of Aviation Equipment" of the Military Training and Research Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy".

BLEDNYKH, Danila Vladimirovich, Student, Dept. of «Industrial and Civil Engineering» (VSTU).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 31-40, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).