

М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын, Е. А. Макарова

**ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РЕКОНФИГУРАЦИИ НЕРВЮРЫ АДАПТИВНОГО КРЫЛА,
ИЗГОТОВЛЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: mikhail.vetlitsyn@mail.ru

В статье представлены результаты исследований прототипа нервюры адаптивного крыла, построенного с применением аддитивных технологий. По результатам исследования надежности изделия в процессе тестовых испытаний выполнен математический анализ вероятности возникновения недопустимых отклонений реконфигурации в различных режимах эксплуатации.

Ключевые слова: адаптивное крыло, аддитивные технологии, статистическая вероятность, математическое ожидание, дисперсия.

М. Yu. Vetlitsyn, Yu. A. Vetlitsyn, E. A. Makarova

**PECULIARITIES OF EVALUATION OF RIB RECONFIGURATION
OF ADAPTIVE WING PRODUCED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES**

Volgograd State Technical University

The article presents the results of research on the adaptive wing rib prototype built using additive technologies. Based on the results of the study of product reliability in the course of test tests, a mathematical analysis of the probability of occurrence of unacceptable reconfiguration deviations in various operating modes was performed.

Keywords: adaptive wing, additive technologies, statistical probability, mathematical expectation, variance.

Применение малых БПЛА при решении различных оперативно-тактических задач прочно вошло в практику большинства развитых государств мира. БПЛА различных назначений уже предлагаются на рынке авиационной техники от ведущих производителей из США, Китая

и Турции. Нарастивание объемов производства БПЛА связано с применением современных аддитивных технологий, что позволяет иметь приемлемую стоимость устройств при значительных объемах производства и дает возможность варьировать конструктивное исполнение под необходимые задачи [1; 2]. Одними из первых применение аддитивных технологий освоили производители из США, применившие в конструкциях БПЛА элементы из материалов, отвердевающих при определенных воздействиях с последующей возможностью управления формой полученного изделия.

Аддитивные технологии позволили мировым разработчикам авиационной техники предложить технические конструкции крыльев, имеющие возможность реконфигурации. Основные параметры геометрии и формы крыльев летательных аппаратов определены различными научными школами на основе аэродинамических исследований и расчетов с использованием структурного и оптимизационного анализа, поэтому к конструкциям адаптивных крыльев предъявляются следующие основополагающие ограничения [3; 4; 5]:

- изменение распределения толщины аэродинамического профиля должно происходить без нарушения конструктивной целостности и с сохранением необходимой механической прочности;

- допустимая максимальная неконтролируемая деформация наружной обшивки крыла, не должна превышать 2 % линейного размера;

- допустимый угол β изгиба реконфигурируемых элементов, должен обеспечивать необходимые аэродинамические качества, при этом не нарушая единство конструкции летательного аппарата во всех режимах работы.

Существует много вариантов конструкций аэродинамического профиля, позволяющих управлять контуром поверхности, крыла в целях решения задачи оптимизации полетного режима. Для реконфигурируемых конструкций, созданных с помощью аддитивных технологий, точность и стабильность выполнения операций реконфигурации зависит не только от функциональных возможностей привода и системы управления. На погрешность конечного результата существенное влияние оказывают: количество используемых эластичных элементов – связей; динамика передачи усилия от привода к связям; вероятностный характер формы изгиба связей; наличие механических напряжений, передаваемых связям от внешнего контура.

Исследование вероятности возникновения погрешности угла отклонения нервюры проводилось на конструкции, представленной на рисунке, имеющей восемь гибких связей для формирования заданной адаптивной формы поверхности крыла [6].



Конструкция нервюры с поворотными шарнирами и гибкими связями

Для заданного угла отклонения $\alpha = 11^\circ$ допустимая ошибка составляла $\Delta = \pm 0.9^\circ$, и все результаты испытаний были распределены на два исхода («успех» и «неудача»). Статистическая вероятность m успешных результатов из общего числа опытов $N_{оп}$:

$$p_y = \frac{m}{N_{оп}} = 0.85 \quad (1)$$

Вероятность того, что «успешными» окажутся ровно m_1 выполнения угла отклонения в серии из N -кратного исполнения задания по формуле Бернулли:

$$P_N(m_1) = \frac{N!}{m_1! \cdot (N - m_1)!} \cdot (p_y)^{m_1} \cdot (1 - p_y)^{N - m_1} \quad (2)$$

В табл. 1 представлены наибольшие вероятности количества m_1 «успехов» выполнения заданного угла отклонения в быстрых сериях из $N < 20$ реконфигураций [8]. В таких режимах наибольшая вероятность ожидаемого «успеха» соответствует $m_1 = 0.8 \div 0.85 \cdot N$, при этом и значение вероятности $P_N(m_1)$ заметно снижается уже для $N = 20$. Физическое объяснение полученным результатам может быть основано на сохранении остаточных деформаций в гибких элементах – связях, и недостатком времени для точной фиксации положений перемещения приводного исполнительного механизма в режиме динамического изменения задания, формируемого системой управления.

Таблица 1

Вероятности «успеха» в быстрых сериях

Наибольшие вероятности количества m_1 «успешных» реконфигураций, $P_N(m_1)$									
$P_5(4)$	$P_5(5)$	$P_{10}(8)$	$P_{10}(9)$	$P_{15}(12)$	$P_{15}(13)$	$P_{15}(14)$	$P_{20}(16)$	$P_{20}(17)$	$P_{20}(18)$
0,3915	0,4437	0,2759	0,3474	0,2184	0,2856	0,2312	0,1821	0,2428	0,2293

В длительном режиме при большом числе не часто выполняемых реконфигураций исследование вероятностного характера исполнения заданного угла отклонения производилось в со-

ответствие с функцией распределения вероятностей Пуассона [7]. Распределение вероятностей результатов случайных исходов испытаний представлено в табл. 2 [8].

Таблица 2

Распределение вероятностей исходов по возможным интервалам

	Вероятность $p_i = \frac{m_{k_i}}{N}$ нахождения результата в интервале k_i				
Интервал	k_1 , ниже допуска $\Delta < -0.9$	k_2 , ниже желаемого $-0.9 < \Delta < -0.5$	k_3 , в желаемом интервале $-0.5 \leq \Delta \leq 0.5$	k_4 , выше желаемого $0.5 < \Delta < 0.9$	k_5 , выше допуска $\Delta > 0.9$
$p_i = \frac{m_{k_i}}{N}$	0.075	0.1	0.65	0.1	0.075

Распределение Пуассона хорошо применимо при $n \rightarrow \infty$, с условиями $p \ll 1$ и $n \cdot p = \lambda = \text{const}$. При выполнении $n=100$ отклонений вероятность нахождения результата реконфигурации изделия m раз в интервале k_1 (k_5) ниже допустимой границы:

$$P_n(m) = \frac{\lambda_1^m}{m!} e^{-\lambda_1} \quad (3)$$

$$\lambda_1 = n \cdot p_1 = 100 \cdot 0,075 = 7,5 \quad (4)$$

Вероятности исхода реконфигурации изделия в недопустимых интервалах k_1 или k_5 при $n=100$ для различных m сведены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятности количества исходов m в интервале k_1 при выполнении $n=100$ реконфигураций

Количество, m	3	4	5	6	7	8
Вероятность, $P_n(m)$	0,0389	0,0729	0,1094	0,1367	0,1465	0,1373
Количество, m	9	10	11	12	13	14
Вероятность, $P_n(m)$	0,1144	0,0858	0,0585	0,0366	0,0211	0,0113

В длительном режиме не частых реконфигураций наиболее вероятные количества выходов за допустимые параметры угла отклонения составляют на каждые $n=100$ реконфигураций по $m=5 \div 9$ отклонений в интервалах $k_1(k_5)$. Результат вполне удовлетворительный, с учетом возможности формирования и исполнения повторной корректирующей команды.

Для технических устройств важной характеристикой является вероятность выполнения задания с определенной точностью с «первой

попытки». В мехатронных системах считается верным предположение о нормальном законе распределения. В таком предположении вероятность нахождения значения угла отклонения α после реконфигурации изделия в жестко установленном интервале ($a < \alpha < b$), определяется выражением:

$$P\{a < \alpha < b\} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

Для исследуемой конструкции по результатам испытаний определены математическое

ожидаемое $\mu = 10.98 \cong 11.0$, дисперсия $\sigma^2 = S_0^2 = 0.305$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = S_0 = 0.55$ [9].

Искомая вероятность нахождения угла отклонения в пределах интервала (a, b) определяется по выражению [7, 10]:

$$P\{a < \alpha < b\} = \Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right) \quad (6)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа, с известными табличными значениями.

Вероятности нахождения угла отклонения α в интервале (a, b) при однократном управляющем воздействии составляют:

$$P\{10.5 < \alpha < 11.5\} = 2 \cdot \Phi\left(\frac{11.5-10.98}{0.55}\right) = 0.655 \quad (7)$$

$$P\{10.8 < \alpha < 11.2\} = 2 \cdot \Phi\left(\frac{11.2-10.98}{0.55}\right) = 0.311 \quad (8)$$

Аддитивные технологии находят в промышленности все более широкое применение, являясь одним из перспективных видов производства, сложных конструктивных форм элементов БПЛА.

В быстрых сериях исследуемый объект показал высокие вероятности успешной реконфигурации для 5 операций. В сериях до 20 отклонений точность обеспечивается в 80 % случаев. В длительном режиме наиболее вероятные количества выходов за допустимые параметры составляют по 5÷9 отклонений на каждые $n=100$. Вероятность точного выполнения угла отклонения с «первой попытки» сильно зависит от требований задания.

Исследование вероятности отклонения адаптивных элементов от заданных параметров показывает необходимость улучшения изделий, особенно, для работы в динамических режимах. Сдерживающими факторами построения адаптивных конструкций БПЛА на базе аддитивных технологий являются: ограниченное количество, а часто и отсутствие, импортных модельных материалов с требуемыми механическими

и технологическими свойствами; использование для производства импортного оборудования, с ограниченной номенклатурой конструкционных материалов и технологических режимов синтеза элементов конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sofla A.Y.N., Meguid S.A., Tan K.K., Yeo W.K. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. *Mater. Des.* 2010, 31, 1284 – 1292.
2. Michael Sinapius, Hans Peter Monner, Markus Kintscher, Johannes Riemenschneider. DLR's morphing wing activities within the European network. 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. *Procedia IUTAM* 10 (2014), 416-426.
3. Егеп, С. М. Основы авиационной техники : учебник / С. М. Егеп, А. М. Матвеев, И. А. Шаталов ; под ред. И. А. Шаталова. – Изд. третье, исправл. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 720 с. : ил.
4. Anderson, J. D. Fundamentals of Aerodynamics. 5th ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2011.
5. Lee S. C., Thomas S. D., Holst T. L. A fast viscous correction method for full-potential transonic wing analysis. ICAS-84-1.2.3. перевод, ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского, ж. Техническая информация №2, 1986г., с.1-9.
6. Ивченко, А. В. Мехатронный узел и каркас адаптивного крыла / А. В. Ивченко, Н. Г. Шаронов // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : матер. Междунар. науч.-практич. конф., Волгоград, 09–11 октября 2018 года / под редакцией И. А. Каляева, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – С. 176–177.
7. Ильин, В. А. Высшая математика : учебник – 2-е изд., перераб. и доп. / В. А. Ильин, А. В. Куркина. – М. : ТК Велби, изд-во Проспект, 2006. – 592 с.
8. Ветлицын, М. Ю. Вероятностная оценка надежности реконфигурируемой панели в конструкции крыла БПЛА для различных режимов эксплуатации / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын, А. В. Нелюбова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8(267) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 63–66.
9. Ветлицын, М. Ю. Оценка стабильности работы мехатронного узла нервюры БПЛА с цифровой системой управления / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1(260) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 53–56.
10. Овсянников, С. В. Экспериментальные исследования в мехатронных системах : учеб. пособие. Ч. 2 / С. В. Овсянников, А. А. Бошляков, А. О. Кузьмина. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2011. – 56 с.