

УДК 531.74:628.92

А.С. ОГАНЕСЯН, Н.Д. КОШЕВОЙ, М.В. ЦЕХОВСКОЙ, В.А. ГОРДИЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ РУЛЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ САМОЛЕТА

Рассмотрена научно-техническая проблема измерения угловых отклонений рулевых поверхностей летательного аппарата. Предложено конструкторское решение по реализации основного элемента датчика – металлической дуги для установки фотоприемников; приведен способ установки датчика на самолет. С применением полного факторного эксперимента 2^3 выведена форма математической модели объекта. Рассмотрен параметр оптимизации и влияющие факторы. Дано теоретическое описание проверки модели на адекватность, выявления значимых и незначимых коэффициентов полученной математической модели.

Ключевые слова: измерение углов, рулевая поверхность, планирование эксперимента, оптимизация.

Введение

В условиях, сложившихся на данный момент на мировом рынке авиационной промышленности, приоритетную роль в процессах производства играет внедрение современных цифровых автоматизированных систем. Как известно, в современной отечественной авиационной промышленности уровень автоматизации испытательных комплексов далеко не всегда соответствует требованиям, которые должны быть обеспечены на действующих и конкурентоспособных предприятиях.

Среди прочих систем с низким уровнем автоматизации находятся и устройства, обеспечивающие измерение угловых отклонений рулевых поверхностей самолета. В данное время для измерения выше-

описанной величины применяются морально устаревшие указатели, не способные выдавать выходной сигнал, низкоточностные, погрешность которых во многом зависит от человеческого фактора.

Постановка задачи исследования

С целью усовершенствования данной системы и надления её возможностью сопряжения с другими устройствами (путём передачи выходных сигналов), увеличения точности измерений и снижения зависимости от человеческого фактора было предложено электронное устройство для измерения угловых отклонений рулевых поверхностей самолёта [1] и его дальнейшая модификация [2]. Схема устройства изображена на рис. 1.

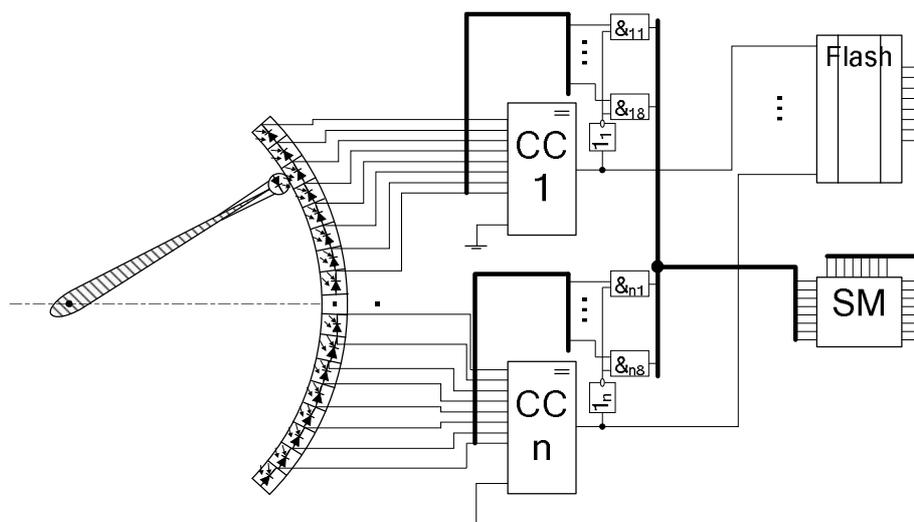


Рис. 1. Устройство для измерения угла поворота рулевой поверхности самолёта

В работе над данным устройством необходимо более детально разработать конструкцию металлической дуги, непосредственно на которую будут крепиться фотоприёмники. Далее, необходимо осуществить планирование полнофакторного эксперимента с целью выявления оптимальных условий при эксплуатации данного устройства, построить математическую модель приведенного объекта и провести интерполяцию получившейся модели.

Таким образом, для решения описанных выше задач устройство для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета можно представить в виде упрощенной схемы, рассматривая электронный блок как единый интегральный элемент.

Разработка усовершенствованной конструкции устройства

Конструкция металлической дуги, на которую будут крепиться фотоприёмники, должна обеспечивать достаточную жесткость, как можно более компактное размещение принимающих элементов, прецизионную их фиксацию и ремонтоспособность, т.е. возможность замены одного или нескольких элементов без отрыва от производственных процессов. Кроме того, металлическая дуга должна иметь жесткое и надежное крепление к неподвижным частям самолёта, изменение углового положения рулевой поверхности которого измеряется.

С целью соответствия поставленным выше условиям предлагается конструкция металлической дуги для установки фотоприёмников, элемент которой показан на рис. 2.

Здесь d_1 – диаметр фотоприёмника, d_2 – диаметр отверстия. При использовании в качестве фотоприёмников фототранзисторов ВРТ-ВР2331 либо ВРТ-ВР2931, применение которых рекомендуется в работе [3], эти величины будут равны: $d_1 = 3,00$ мм, $d_2 = 3,05$ мм. Такие размеры позволяют производить посадку с натягом в соответствии с допусками на диаметры отверстия и оболочки фототранзистора. При этом расстояние между отверстиями l должно быть равным 2 мм. Такое расстояние уверенно позволяет сохранять дугу целостной и невредимой между отверстиями во время их сверления.

Дугу рекомендуется выполнять из дюралюминия. Это обеспечит небольшой вес дуги и достаточную её прочность. Два ребра по бокам дуги обеспечивают необходимую жесткость конструкции.

Металлическая дуга устанавливается для измерения угла отклонения руля высоты либо элерона при помощи соединения с металлическим башмаком, устанавливаемым на поверхность крыла либо стабилизатора. Во избежание возможного скольжения установленного датчика на нижнюю поверх-

ность башмака наносится слой резины. При установке дуги для измерения угла отклонения руля направления на фюзеляже самолёта (например, АН-74 и АН-140) существуют технологические отверстия для крепления штанг, удерживающих металлическую дугу [1]. Таким образом, обеспечивается надежное и жесткое соединение металлической дуги с неподвижными частями летательного аппарата.

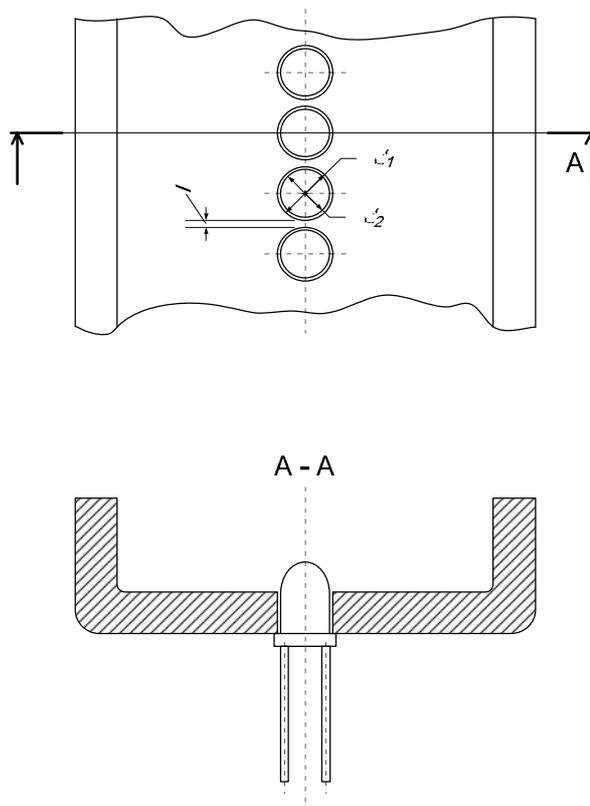


Рис. 2. Элемент конструкции дуги для крепления фотоприёмников

В качестве фотоприемающих элементов, как обосновано в работе [3], наиболее эффективно использовать фотодиоды КДФ-101 либо фототранзисторы ВРТ-ВР2931 и ВРТ-ВР2331. При детальном изучении поставленной задачи и вариантов исполнения данного измерительного устройства было установлено, что использование фотодиода КДФ-101 не является оптимальным вариантом. Причины, по которым необходимо использовать фототранзисторы, следующие:

- низкая технологичность установки фотодиода КДФ-101, обусловленная геометрической формой диода (торец представляет собой усеченную окружность);
- отсутствие необходимости дополнительного усиления сигнала, что, по сравнению с использованием фотодиодов, значительно уменьшит количество используемых электронных компонентов при физической реализации схемы.

Планирование эксперимента

При проектировании систем любого уровня сложности необходимо иметь четкое представление о функциональных способностях данной системы. В первую очередь должно иметься адекватное представление о том, как максимально эффективно использовать рассматриваемый объект. Для достижения данной цели важно выявить те параметры, которые будут говорить об уровне эффективности использования системы. «Голосом» параметров станут математические модели, которые наиболее полно отобразят влияние внешних процессов на исследуемый объект.

Итак, для построения математической модели и оценки наиболее эффективного использования приведенной выше схемы измерения угловых отклонений рулевых поверхностей самолета необходимо определить, какой именно параметр выступит показателем эффективности.

Исследуемая система строится на применении фототранзисторов. Соответственно, выходной сигнал засвеченного фототранзистора будет являться определяющим критерием. В ходе эксперимента важно будет не только определить, каким образом влияют те или иные внешние процессы на конкретный приёмник света, но и то, как это влияние сказывается на расположенных с ним по соседству элементах.

Для поставленных задач нахождения оптимума и построения интерполяционной модели можно эффективно применять планирование эксперимента. Это позволит сократить количество опытов по сравнению с другими методами интерполяции и оптимизации и даст возможность построить математические модели, характеризующие влияние исследуемых факторов на выходной сигнал фототранзисторов. Кроме того, будет иметься возможность провести проверку адекватности математических моделей и убедиться в корректности результатов.

Параметром оптимизации, как говорилось выше, выступит выходной сигнал фототранзистора, а именно напряжение (т.к. необходимо будет установить влияние не на один, а на три расположенных по соседству приемника, то будет измеряться три напряжения U_1 , U_2 , U_3).

Факторы, изменение которых будет наиболее существенно сказываться на параметре оптимизации, – угловое положение источника света относительно приемника α (x_1); интервал между источником и приемником ΔY (x_2); дистанция между источником и приемником ΔX (x_3) (рис. 3). Результатом экспериментальной части исследования должны стать функции:

$$\begin{aligned} U_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3); \\ U_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3); \\ U_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Первый этап планирования эксперимента для получения модели основан на варьировании факторов на двух уровнях. В этом случае можно сразу найти число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов: $N = 2^k$, где N – число опытов, k – число факторов, 2 – число уровней [4]. Такой эксперимент принято называть полным факторным экспериментом 2^k . Экспериментальная область факторного пространства будет ограничена следующими значениями факторов:

$$\begin{aligned} x_1 &\in (-3,5^\circ; 3,5^\circ); \\ x_2 &\in (-2,5\text{мм}; 2,5\text{мм}); \\ x_3 &\in (0\text{ мм}; 4\text{ мм}). \end{aligned}$$

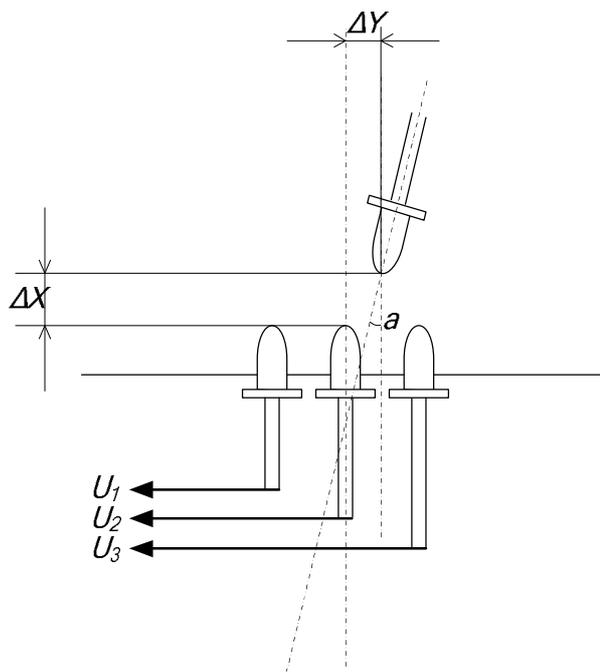


Рис. 3. Факторы, влияющие на параметр оптимизации

Границы области факторного пространства определены, исходя из рассуждений, что область эксперимента должна содержать в себе значения факторов, которые могут появиться вследствие неточной установки датчика на измеряемую поверхность, при этом корректность работы системы не должна нарушаться.

Для задания определенных уровней факторов в процессе экспериментирования используется платформа, конструкция которой приведена на рис. 4.

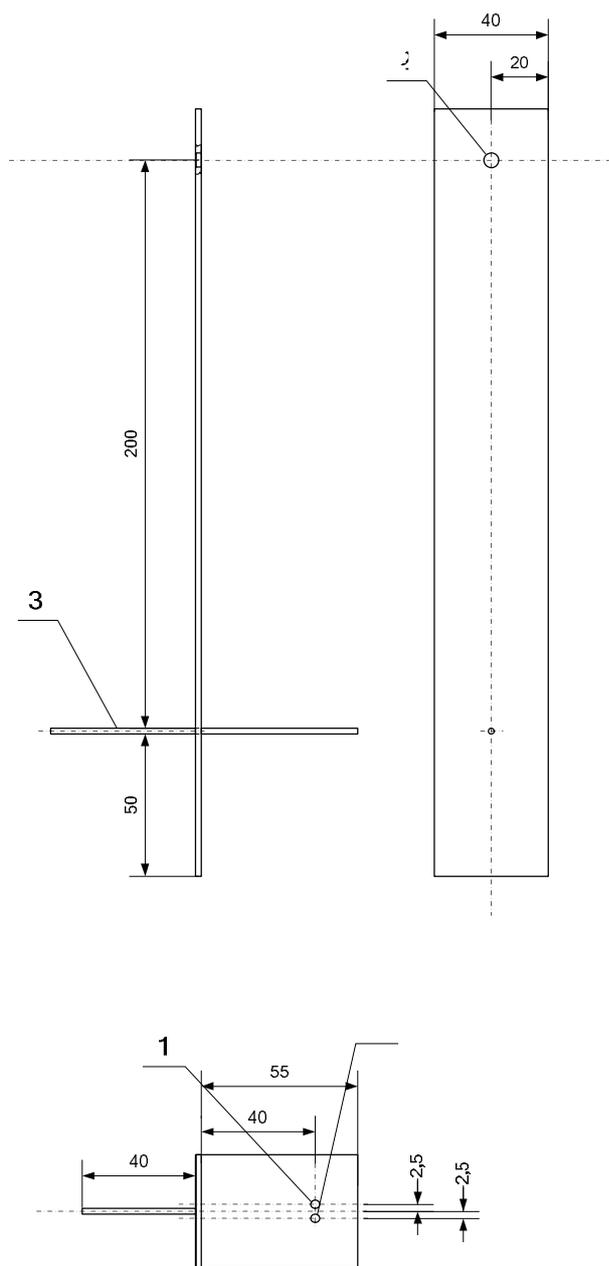


Рис. 4. Платформа, задающая значения факторов

В отверстиях 1 и 2 устанавливаются принимающие фототранзисторы. Положение отверстия 1 соответствует уровню «-1» фактора x_2 , положение отверстия 2 – уровню «+1» этого же фактора. Стержень 3 устанавливается в отверстие, находящееся на поверхности испытательного стенда. На эту же поверхность закрепляется и металлическая дуга измеряющего устройства. Перемещением дуги на определенные дистанции относительно платформы устанавливается необходимое значение фактора x_3 . Отверстие 4 служит для закрепления платформы в угловом положении. Это отверстие совмещается с отверстием на поверхности испытательного стенда и

закрепляется болтовым соединением. При этом расположение отверстия на поверхности испытательного стенда соответствует заданному уровню фактора x_1 («-1» либо «+1»). Таким образом, платформа обеспечивает установку всех необходимых уровней имеющихся 3-х факторов.

Имеющиеся уровни факторов и интервалы варьирования удобно представить в форме табл. 1.

Таблица 1
Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования	Размерность
	-1	0	+1		
$x_1(\alpha)$	-3,5	0	3,5	3,5	град
$x_2(\Delta y)$	-2,5	0	2,5	2,5	мм
$x_3(\Delta x)$	0	2	4	2	мм

Принимая значение нижнего уровня за -1, а верхнего – за +1, для факторов с непрерывной областью определения всегда можно легко найти кодированное значение фактора:

$$x = \frac{\bar{x} - \bar{x}_0}{I}, \quad (2)$$

где \bar{x} – натуральное значение фактора;

\bar{x}_0 – натуральное значение основного уровня;

I – интервал варьирования.

В случае полного факторного эксперимента 2^3 матрица планирования эксперимента (с учетом измерения напряжений с трех фототранзисторов) примет следующий вид (табл. 2):

Таблица 2
Матрица планирования эксперимента

№п/п	x_1	x_2	x_3	U_1	U_2	U_3
1	-1	-1	-1	U_{11}	U_{21}	U_{31}
2	+1	-1	-1	U_{12}	U_{22}	U_{32}
3	-1	+1	-1	U_{13}	U_{23}	U_{33}
4	+1	+1	-1	U_{14}	U_{24}	U_{34}
5	-1	-1	+1	U_{15}	U_{25}	U_{35}
6	+1	-1	+1	U_{16}	U_{26}	U_{36}
7	-1	+1	+1	U_{17}	U_{27}	U_{37}
8	+1	+1	+1	U_{18}	U_{28}	U_{38}

При помощи полного факторного эксперимента 2^3 функцию $U = f(x_1, x_2, x_3)$ можно интерполировать математической моделью в виде:

$$U = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Коэффициенты b_0, b_j можно вычислить по следующим формулам:

$$b_0 = \bar{U}; \quad (4)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} U_i}{N}. \quad (5)$$

Коэффициенты, начиная с b_{12} позволяют количественно оценивать эффект взаимодействия нескольких факторов. Для их вычисления необходимо расширить матрицу планирования эксперимента (табл. 3).

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента 2^3 с учетом эффекта взаимодействия

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Значения в столбцах $x_1x_2 - x_1x_2x_3$ образуются путем перемножения значений в соответствующих ячейках столбцов x_1, x_2, x_3 и служат только для расчета. Используя данную матрицу, по аналогии с вычислением коэффициентов b_j находятся и оставшиеся коэффициенты.

После вычислений всех коэффициентов трех многочленов (для каждого из исследуемых приемников) необходимо проверить адекватность полученных математических моделей.

Для проверки гипотезы об адекватности можно использовать F-критерий (критерий Фишера) [4]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{U\}}^2}, \quad (6)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности; $S_{\{U\}}^2$ – дисперсия параметра оптимизации.

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta U_i^2}{f}; \quad (7)$$

$$\Delta U_i = \bar{U} - U_i. \quad (8)$$

f – количество степеней свободы. Для полного факторного эксперимента $2^3 f = 4$.

$$S_{\{U\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^m (U_{iq} - \bar{U}_i)^2}{N(m-1)}. \quad (9)$$

Для вычислений по формуле (8) необходимо проводить повторные опыты в каждой точке эксперимента. Здесь m – количество повторных опытов, \bar{U}_i – среднее значение выходного сигнала за m повторных наблюдений, N – число опытов в матрице планирования эксперимента.

При использовании критерия Фишера проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением [4]. Для этого необходимо выбрать уровень значимости, в данной задаче вполне достаточно 5%. Исходя из этого, табличное значение для степени свободы дисперсии адекватности $f_1 = 4$ и степени свободы дисперсии параметра оптимизации $f_2 = 2$ (для трех повторных опытов), имеем граничное табличное значение F-критерия: 6,9.

Для определения значимости коэффициентов математических моделей можно воспользоваться критерием Стьюдента. В данном случае определяется доверительный интервал Δb_j для коэффициентов. Коэффициент является значимым, если его абсолютное значение больше доверительного интервала. Для выявления доверительного интервала необходимо найти дисперсию искомого коэффициента и квадратичную ошибку коэффициентов:

$$S_{\{b_j\}}^2 = \frac{S_{\{U\}}^2}{N}; \quad (10)$$

$$S_{\{b_j\}} = + \sqrt{S_{\{b_j\}}^2}. \quad (11)$$

Используя полученную квадратичную ошибку коэффициентов, которая равна для всех коэффициентов многочлена, можно получить доверительный интервал:

$$\Delta b_j = \pm t S_{\{b_j\}}, \quad (12)$$

где t – значение критерия Стьюдента выбранное с 5%-ным уровнем значимости. В соответствии со значениями, приведенными в [4], $t = 2,776$.

В итоге, коэффициенты, признанные в результате расчетов незначимыми, отбрасываются, и математическая модель приобретает окончательный вид, используя который и можно производить оптимизацию по выбранному критерию.

Выводы

Научно-практическим итогом данной работы является разработка инновационной конструкции устройства для измерения угловых отклонений рулевых поверхностей. С применением планирования

эксперимента приведен способ оптимизирования исследуемого объекта по выходному параметру, снятому с трех фотоприемников, расположенных на металлической дуге датчика. Приведена формула математической модели, показано вычисление коэффициентов в ней. Описаны способы нахождения заключения об адекватности полученной модели и определения значимости коэффициентов.

Результаты работы необходимо применить непосредственно в проведении практического эксперимента. На основании полученных данных можно будет составить конкретные математические модели и провести оптимизацию.

Литература

1. Кошевой Н.Д. Универсальный фотозлектрический датчик углового перемещения рулевых поверхностей самолета / Н.Д. Кошевой, А.С. Оганесян // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені*

Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2007. – Вип. 11. – С. 34-37.

2. Оганесян А.С. Схемотехнические решения по проектированию оптического устройства для измерения угла поворота рулевой поверхности самолета / А.С. Оганесян, Н.Д. Кошевой, М.В. Цеховской // *Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал.* – Х., 2009. – №3. – С. 75-78.

3. Кошевой Н.Д. Сравнительный анализ альтернативных элементных баз фотозлектрического датчика углового перемещения рулевых поверхностей самолетов Ан-74 и Ан-140 / Н.Д. Кошевой, А.С. Оганесян // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2008. – Вып. 38. – С. 223-229.

4. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

Поступила в редакцию: 20.11.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информатики А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРИБОРУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ ВІДХИЛЕНЬ РУЛЬОВИХ ПОВЕРХОНЬ ЛІТАКА

А.С. Оганесян, М.Д. Кошовий, М.В. Цеховський, В.О. Гордієнко

Розглянуто науково-технічну проблему вимірювання кутів відхилень рульових поверхонь літального апарату. Запропоновано конструкторське рішення з реалізації основного елементу датчика – металевої дуги для встановлення фотоприймачів; наведено спосіб встановлення датчика на літак. Із застосуванням повного факторного експерименту 2^3 винайдена форма математичної моделі об'єкту. Розглянуто параметр оптимізації та впливаючі чинники. Надано теоретичний опис: перевірки моделі на адекватність, виявлення маючих та не маючих значення коефіцієнтів отриманої математичної моделі.

Ключові слова: вимірювання кутів, рульова поверхня, планування експерименту, оптимізація.

EXPERIMENT PLANNING METHOD'S APPLICATION IN ANALYSIS OF DEVICE FOR MEASURING ANGULAR DEVIATION AIRCRAFT'S STEERING SURFACES

A.S. Oganessian, M.D. Koshovy, M.V. Tshovsky, V.A. Gordienko

Scientific-technical problem of measuring aircraft steering surface's angle of deviation is viewed. Decision of sensor's main element (metallic arc for photo receivers mounting) constructive realization is offered. Scheme of installation sensor on airplane is presented. Mathematics model form concluded with application of full-factor experiment 2^3 . Optimization parameter and influencing factors are viewed. Model's adequacy checking and definition of significant and insignificant mathematics model's coefficients are theoretically overviewed.

Key words: angles measuring, steering surface, experiment planning, optimization.

Оганесян Артем Семенович – ассистент каф. 301, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: artuom.oganesyan@gmail.com.

Кошевой Николай Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой 303, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Цеховской Максим Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры 303, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tshovsky@gambler.ru.

Гордиенко Валентин Александрович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры 303, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.