

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМОНСТРАТОРА АВИАЦИОННОГО ШАССИ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

С.А. Говор¹
О.Н. Катков²

Govor_sa@mail.ru
polit-s@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен алгоритм планирования эксперимента для летательного аппарата с шасси на воздушной подушке. Эксперименты проведены для двух режимов: статический и квазидинамический. Разработаны две математические модели для статического и квазидинамического режимов с учетом разных поверхностей. Для многофакторной регрессионной модели, полученной для квазидинамического режима, проведено 24 эксперимента, а для модели, полученной для статического режима, — 12 испытаний. Установлено, что при несоответствии линейной многофакторной модели первого порядка заданным параметрам точности и адекватности модели порядок полиномов необходимо повышать. Чем выше порядок аппроксимирующего полинома, тем выше точность описания исходной математической модели. Для летательного аппарата с шасси на воздушной подушке достаточно полинома второго порядка. Это подтверждает достоверность полученных данных

Ключевые слова

Воздушная подушка, самолет с шасси на воздушной подушке, шасси на воздушной подушке, планирование эксперимента, число экспериментов, уравнение регрессии

Поступила в редакцию 29.02.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Аэродинамические характеристики летательных аппаратов (ЛА) с шасси на воздушной подушке играют важную роль при выборе режимов полета, а также при создании необходимых управляющих сил и моментов в целях сохранения параметров траекторий и заданного положения судна в пространстве. При перемещениях ЛА изменение усилия на тресе самолета проводят для перевода их с одной поверхности на другую, преодоления высот препятствий, изменения характеристик судна и т. п. Возможные значения эффективного усилия на тресе в момент трогания в первую очередь зависят от поверхности, на которой находится ЛА, давления в скегах, давления в воздушной подушке и клиренса.

Как правило, конструкции ЛА содержат одно крыло, фюзеляж, оперение, маршевые двигатели, ограждение воздушной подушки, включающей боковые скеги, нагнетатель воздуха для создания воздушной подушки. Проведенные разработки и аэродинамические испытания выявили преимущества ЛА на воз-

душной подушке по сравнению с другими ЛА, применяемыми для транспортировки груза в труднодоступные регионы. Основные преимущества заключаются в следующем: перевоз крупногабаритного груза; большой ресурс; взлет и посадка на необорудованных территориях; экономия топлива. Достигнутый в настоящее время уровень характеристик ЛА не является пределом возможного, работы по дальнейшему более углубленному исследованию ЛА продолжаются.

Рассмотрим традиционную методику проведения испытаний. Выбирают одно из требуемых сочетаний высоты препятствия и усилия, устанавливают соответствующие значения давления, выбирают поверхность и датчиками измеряют возникающее усилие. Затем изменяют высоту препятствия, соответственно корректируют параметры давления и вновь регистрируют усилие и т. д. Другими словами, испытания сводят к серии многофакторных экспериментов, в каждом из которых изучают влияние факторов на усилие в момент трогания ЛА (самолета) с места (функция отклика). Испытания по определению аэродинамических характеристик представляют собой задачу, при решении которой возможно эффективное использование методов теории планирования эксперимента (ТПЭ), позволяющих получить требуемые результаты при существенном сокращении необходимого числа экспериментов [1]. Основная особенность методов ТПЭ — многофакторный подход к проведению эксперимента, предусматривающий не поочередное, а одновременное изменение от точки к точке всех действующих факторов. Разработанные в теории методы составления оптимальных планов многофакторного эксперимента позволяют выбрать для их проведения наиболее информативные сочетания значений определяющих факторов и обоснованно назначить число экспериментов, необходимое и достаточное для получения результата с требуемой полнотой и точностью [1].

Постановка задачи. Для нахождения определяющих факторов и усилия на тросе тянущего ЛА была применена многофакторная регрессионная модель для двух режимов планирования: статическом и квазидинамическом. Для определения параметров демонстратора авиационного шасси на воздушной подушке при

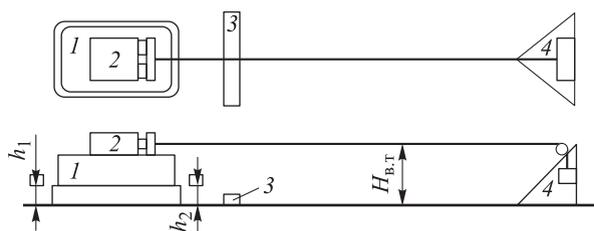


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема стенда для определения параметров демонстратора авиационного шасси на воздушной подушке при статическом и квазидинамическом режимах:

h_1, h_2 — высоты объекта испытания; $H_{в.т}$ — высота вектора тяги; 1 — объект испытания (тип ЛА); 2 — контрольно-измерительный комплекс; 3 — типовая единичная неровность; 4 — тянущее устройство (жесткая рама и электрическая лебедка)

статическом и квазидинамическом режимах использована конструктивно-компоновочная схема стенда, представленная на рис. 1. Значения измеряемых параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения измеряемых параметров

Параметр	Датчик	Диапазон измерений	Точность	Частота измерения, измерения/с
Сила, кН	Динамометр цифровой	0–10 кН	0,01	10
Возникающие моменты	Сдвоенный динамометр цифровой		0,01	
Момент трогания объекта с места	Контактор	0–1	15 мм	Однократно в период эксперимента
Давление в скегах	Манометр	0–0,6 кг/см ²	0,15 %	
Давление в воздушной подушке	Манометр	0–0,6 кг/см ²	0,15 %	
Частота вращения вентилятора нагнетателя	Оптоэлектронный датчик частоты вращения	0–10 000 мин ⁻¹	1,00 %	
Клиренс, угол тангажа	Сдвоенный сонар	0,3–5,0 м	0,10 %	10

Объект испытаний — демонстратор авиационного шасси на воздушной подушке.

Условия испытаний: стенд обеспечивает снятие необходимых характеристик при нахождении объекта испытаний как на естественных подстилающих поверхностях с разной несущей способностью, так и при прохождении типовых неровностей в квазидинамическом режиме.

На этапе испытаний в статическом режиме стенд используют как тянущее устройство. Объект не закрепляют в стенде. На этапе испытаний в квазидинамическом режиме обеспечивают следующие степени свободы объекта:

- ограничено перемещение по поперечной оси объекта в плоскости подстилающей поверхности;
- вдоль продольной оси объекта допускаются малые перемещения, позволяющие зафиксировать начало движения;
- допускаются вращения объекта по тангажу и крену, позволяющие измерять клиренс и тангаж объекта при различных режимах работы.

В статическом режиме испытания фиксируемыми параметрами на объекте являются изменения расхода воздуха, давления в воздушной подушке, клиренса, угла тангажа аппарата при различном давлении воздуха в скегах, частоты вращения вентилятора нагнетателя, маршевой тяги, уровни загрузки объекта.

В квазидинамическом режиме испытания объект с помощью электрической лебедки, закрепленной на высоте вектора тяги, протягивают по единичным типовым неровностям (возможна установка неровностей под различными углами по отношению к продольной оси объекта). Используют предусмотренный планом эксперимента набор типовых неровностей разной высоты и формы. Передвижение объекта для его позиционирования перед типовой неровностью осуществляют с помощью тянущего устройства.

Математическая модель имеет вид

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_9 x_9 + \varepsilon,$$

где β_i — коэффициенты регрессии; ε — погрешность эксперимента.

В статическом режиме испытаний осуществлена регистрация данных с момента начала натяжения троса тянущего устройства до срабатывания контактного датчика. Из полученного массива данных после фильтрации было выбрано максимальное значение.

В квазидинамическом режиме испытаний данные измерены с частотой 10 Гц с момента начала натяжения троса тянущего устройства до момента преодоления объектом единичной неровности.

Планирование эксперимента. Эта процедура заключалась в выборе числа и условий проведения экспериментов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. При этом следует:

- стремиться к минимизации общего числа экспериментов;
- одновременно варьировать переменные, определяющие процесс, по специальным правилам — алгоритмам;
- использовать математический аппарат, формализующий многие действия экспериментатора;
- выбирать четкую стратегию, позволяющую принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

Цель планирования эксперимента — нахождение таких условий и правил проведения экспериментов, при которых можно получить надежную и достоверную информацию об объекте исследования с наименьшей затратой труда и времени, а также представить эту информацию в компактной и удобной форме с количественной оценкой точности [1, 2].

В эксперименте использована идея последовательного планирования. Общее число измерений, отведенное на эксперимент, разбивается на несколько частей, а эксперимент — на несколько этапов. На каждом этапе планируют соответствующую часть измерений, проводят измерения и анализируют полученные результаты и сведения, поступающие извне [3–5].

Зависимость отклика от факторов называют функцией отклика, а геометрическое представление функции отклика — поверхностью отклика. Функцию отклика рассматривают как показатель качества или эффективности объекта.

В настоящей работе факторы описаны количественными значениями и представлены непрерывными величинами. Переменным x_i сопоставлено геометрическое понятие факторного пространства — пространства, координатные оси которого соответствуют значениям факторов. Совокупность конкретных значений всех факторов образует точку в многомерном факторном пространстве [6, 7].

Задачи и методы планирования эксперимента непосредственно связаны с методом наименьших квадратов — оптимальным в рассматриваемом случае методом обработки данных. Эта оптимальность имеет место при заданной выборке x_i , $i=1, \dots, N$. Однако достигаемая точность оценок будет зависеть от выбора экспериментальных точек, другими словами, от условий проведения эксперимента [8, 9].

Область планирования эксперимента зададим интервалами возможного изменения факторов $x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}$, $i=1, \dots, k$, где k — число факторов. В планировании эксперимента используют нормированные факторы (табл. 2), т. е. безразмерные (кодированные) величины. Переход к безразмерным значениям x_i задают соотношением

$$x_i = \frac{x_i^* - x_{i0}^*}{\Delta x_i^*},$$

где x_i^* — значение i -го фактора в натуральном масштабе измерения; $x_{i0}^* = (x_{i\max}^* + x_{i\min}^*)/2$ — натуральное значение основного фактора, соответствующего нулю в безразмерной шкале; $\Delta x_i^* = (x_{i\max}^* - x_{i\min}^*)/2$ — интервал варьирования.

Таблица 2

Кодированные переменные

Матрица независимых переменных								Наблюдения
x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	
+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
				+	+	+	+	y_8

План эксперимента задает множество точек проведения экспериментов $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_k^i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, а совокупность значений факторов во всех N точках плана образует матрицу плана

$$\bar{D} = (x_j^i) = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_k^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_k^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_k^N \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы соответствуют экспериментам, столбцы — факторам, элемент матрицы x_j^i задает значение j -го фактора в i -м эксперименте.

Неизвестные коэффициенты многофакторной регрессионной модели вычисляют по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_u y_u}{N}.$$

Первый вопрос после вычисления коэффициентов модели — проверка ее пригодности, т. е. адекватности модели. Для характеристики среднего разброса относительно линии регрессии вполне подходит остаточная сумма квадратов. Неудобство состоит в том, что эта сумма зависит от числа коэффициентов в уравнении: если число коэффициентов модели равно числу независимых экспериментов, остаточная сумма равна нулю. Поэтому предпочитают относить ее на один «свободный» эксперимент. Число таких экспериментов называют числом степеней свободы f .

Остаточную сумму квадратов, разделенную на число степеней свободы, называют остаточной дисперсией, или дисперсией адекватности:

$$s_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}.$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели используют критерий Фишера $f = s_a^2 / s_{\{y\}}^2$, где $s_{\{y\}}^2$ — дисперсия воспроизводимости со своим числом степеней свободы.

Если рассчитанное значение критерия Фишера не превышает значения, взятого из таблицы, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно полагать адекватной. При превышении рассчитанного значения табличного значения гипотеза об адекватности отвергается.

Для дисперсии можно записать общую формулу

$$s_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i (\bar{y}_i - y_i)^2}{f},$$

где N — число различных экспериментов (число строк матрицы); n_i — число параллельных опытов в i -й строке матрицы; \bar{y}_i — среднее арифметическое n_i параллельных экспериментов; y_i — предсказанное по уравнению значение в эксперименте.

Проверку значимости каждого коэффициента проводят независимо. Ее можно осуществлять двумя равноценными способами: проверкой по критерию Стьюдента или построением доверительного интервала. Прежде всего, необходимо найти дисперсию коэффициента регрессии $s_{\{b_i\}}^2 = s_{\{y\}}^2 / N$. Дисперсии всех коэффициентов равны друг другу, так как зависят только от погрешности эксперимента и их числа. Значимость найденных коэффициентов определяют по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,05 и $t_{\text{крит}} = 1,99$. Оценка дисперсии коэффициентов составляет 19,9. Таким образом, дисперсии коэффициентов регрессии будут следующие: для свободного параметра $s^2 \{b_0\} = 0,12$; для коэффициентов при линейных членах $s^2 \{b_i\} = 0,14$. Рассчитанные значения не превышают табличные, на основе чего можно сделать вывод о значимости коэффициентов и адекватности модели.

Статический режим испытания. Математическая модель при планировании эксперимента будет состоять из следующих влияющих факторов:

- 1) поверхность, на которой проводят испытание x_0 ;
- 2) давление в скегах $p_{ci} = x_1$;
- 3) давление в воздушной подушке $p_{pj} = x_2$;
- 4) усилие на тросе тянущего устройства в момент трогания самолета с места базирования $M_{\text{тр}} = y$;
- 5) клиренс $h_{\text{кл}} = x_3$.

Многофакторная регрессионная модель имеет вид

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon.$$

Рассмотрим алгоритм последовательного планирования эксперимента. Для поверхности № 1 и первой серии экспериментов необходимо зафиксировать параметр p_{c1} . Затем решить систему уравнений при известных значениях параметров $p_{п11}, p_{п12}, p_{п13}, h_{\text{кл}11}, h_{\text{кл}12}, h_{\text{кл}13}$ и найти моменты трогания ЛА $M_{\text{тр}11}, M_{\text{тр}12}, M_{\text{тр}13}$:

$$M_{\text{тр}11} = \beta_0 + \beta_1 p_{c1} + \beta_2 p_{п11} + \beta_3 h_{\text{кл}11};$$

$$M_{\text{тр}12} = \beta_0 + \beta_1 p_{c1} + \beta_2 p_{п12} + \beta_3 h_{\text{кл}12};$$

$$M_{\text{тр}13} = \beta_0 + \beta_1 p_{c1} + \beta_2 p_{п13} + \beta_3 h_{\text{кл}13}.$$

Для второй серии экспериментов необходимо зафиксировать параметр p_{c2} . Решить систему уравнений при известных значениях параметров $p_{п21}, p_{п22}, p_{п23}, h_{\text{кл}21}, h_{\text{кл}22}, h_{\text{кл}23}$ и определить моменты трогания ЛА $M_{\text{тр}21}, M_{\text{тр}22}, M_{\text{тр}23}$:

$$M_{\text{тр}21} = \beta_0 + \beta_1 p_{c2} + \beta_2 p_{\text{п}21} + \beta_3 h_{\text{кл}21};$$

$$M_{\text{тр}22} = \beta_0 + \beta_1 p_{c2} + \beta_2 p_{\text{п}22} + \beta_3 h_{\text{кл}22};$$

$$M_{\text{тр}13} = \beta_0 + \beta_1 p_{c2} + \beta_2 p_{\text{п}23} + \beta_3 h_{\text{кл}23}.$$

Алгоритм нахождения неизвестных для поверхности № 2 и двух серий экспериментов аналогичен приведенному алгоритму. В соответствии с решением системы уравнений для многофакторной регрессионной модели на первом этапе статических испытаний запланировано проведение 12 экспериментов (шесть для поверхности № 1 и шести для поверхности № 2 с двумя фиксированными значениями давления в скегах p_{c1}, p_{c2}).

Квазидинамический режим испытаний. Математическая модель для планирования эксперимента состоит из следующих влияющих факторов:

- 1) препятствия двух видов для ЛА: прямоугольное и треугольное.
- 2) высоты препятствий H_1, H_2 ;
- 3) давление в скегах $p_{ci} = x_1$;
- 4) давление в воздушной подушке $p_{pj} = x_2$;
- 5) усилия, возникающие в процессе преодоления препятствия в момент трогания ЛА $M_{\text{тр}} = y$;
- 6) клиренс $h_{\text{кл}} = x_3$;
- 7) перемещение от точки базирования до момента преодоления препятствия $s = x_4$.

Многофакторная регрессионная модель имеет вид

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon.$$

Рассмотрим схему планирования эксперимента. Для прямоугольного препятствия с высотами H_1, H_2 , фиксированным значением давления p_{c1} , с известными значениями параметров $p_{\text{п}11}, p_{\text{п}12}, p_{\text{п}13}, h_{\text{кл}11}, h_{\text{кл}12}, h_{\text{кл}13}, s_{11}, s_{12}, s_{13}$ необходимо решить систему уравнений и найти моменты $M_{\text{тр}11}^1, M_{\text{тр}12}^1, M_{\text{тр}13}^1, M_{\text{тр}11}^2, M_{\text{тр}12}^2, M_{\text{тр}13}^2$. Система уравнений имеет вид

$$M_{\text{тр}11}^1 = \beta_{10} + \beta_{11} p_{c1} + \beta_{12} p_{\text{п}11} + \beta_{13} h_{\text{кл}11} + \beta_{14} s_{11};$$

$$M_{\text{тр}11}^2 = \beta_{20} + \beta_{21} p_{c1} + \beta_{22} p_{\text{п}11} + \beta_{23} h_{\text{кл}11} + \beta_{24} s_{11};$$

$$M_{\text{тр}12}^1 = \beta_{10} + \beta_{11} p_{c1} + \beta_{12} p_{\text{п}12} + \beta_{13} h_{\text{кл}12} + \beta_{14} s_{12};$$

$$M_{\text{тр}12}^2 = \beta_{20} + \beta_{21} p_{c1} + \beta_{22} p_{\text{п}12} + \beta_{23} h_{\text{кл}12} + \beta_{24} s_{12};$$

$$M_{\text{тр}13}^1 = \beta_{10} + \beta_{11} p_{c1} + \beta_{12} p_{\text{п}13} + \beta_{13} h_{\text{кл}13} + \beta_{14} s_{13};$$

$$M_{\text{тр}13}^2 = \beta_{20} + \beta_{21} p_{c1} + \beta_{22} p_{\text{п}13} + \beta_{23} h_{\text{кл}13} + \beta_{24} s_{13}.$$

Аналогично для треугольного препятствия с высотами H_1, H_2 , с фиксированным значением давления p_{c2} после решения системы уравнения можно получить моменты трогания ЛА с места. Из решения системы линейных алгебраи-

ческих уравнений следует, что для многофакторной регрессионной модели квазистатических испытаний необходимо провести 24 эксперимента: 12 экспериментов для прямоугольного препятствия с высотами H_1 , H_2 и 12 экспериментов для треугольного препятствия с высотами H_1 , H_2 . В общей сложности для испытаний в статистическом и квазидинамическом режимах необходимо провести 36 экспериментов.

При несоответствии линейной многофакторной модели первого порядка заданным параметрам точности и адекватности модели порядок уравнения регрессии необходимо увеличить до второго [1, 2, 10]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{nn} x_n^2 + \dots + \beta_{1n} x_1 x_n + \varepsilon.$$

Далее следует увеличивать степень полинома до тех пор, пока аналитическая зависимость полученных данных в эксперименте не достигнет желаемого значения.

Результат планирования эксперимента. Проанализируем полученные экспериментальные данные для квазидинамического режима и многофакторное уравнение регрессии с последовательно изменяющимися степенями полинома. Зависимости момента трогания ЛА от времени при различных значениях давления в скегах приведены на рис. 2. В соответствии с представленными на рис. 2 зависимостями полином первого порядка плохо аппроксимирует зависимость экспериментальных данных от времени.

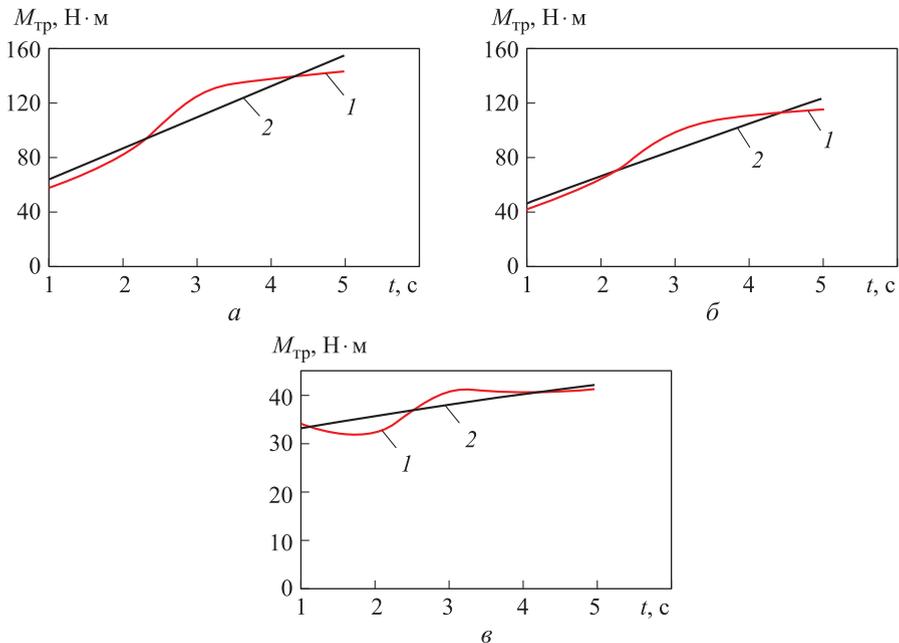


Рис. 2. Зависимость момента трогания ЛА от времени при фиксированных значениях давления в скегах $p_{cl} = 0,8$ (а), $0,6$ (б), $0,5$ (в):

1 — экспериментальные данные; 2 — уравнение регрессии первого порядка (аппроксимирующий полином первой степени)

Зависимости момента трогания ЛА от времени при значении давления в скегах $p_{cl}=0,5$ приведены на рис. 3. Чем выше порядок аппроксимирующего полинома уравнения регрессии, тем выше точность и аппроксимация экспериментальных данных. Таким образом, для рассматриваемого ЛА на шасси с воздушной подушкой для подтверждения достоверности полученных данных и адекватности математической модели достаточно полинома второго порядка.

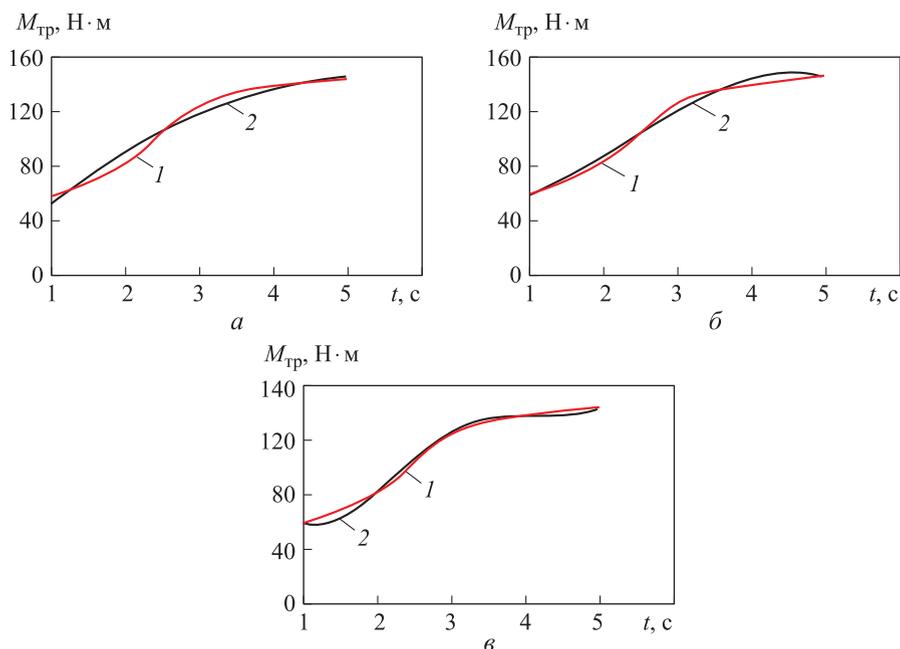


Рис. 3. Зависимость момента трогания ЛА от времени при фиксированном значении $p_{cl}=0,5$:

1 — экспериментальные данные; 2 — уравнение регрессии второго (а), третьего (б) и четвертого (в) порядка (аппроксимирующие полиномы второй, третьей и четвертой степени соответственно)

Выводы. Изложены основные понятия ТПЭ, а также математической обработки результатов эксперимента при решении поставленной задачи (от простой оценки отклика до построения математической модели исследуемого объекта). На основе априорной информации, полученной из литературы, и анализа результатов, проведенных в других работах, в качестве объекта исследования использован ЛА с шасси на воздушной подушке. Для оптимизации и сокращения числа экспериментов, а также экономии ресурсов было выполнено сравнение экспериментальных данных с аналитической зависимостью влияющих факторов. Установлено, что многофакторный полином второй степени с малым отклонением аппроксимирует полученные экспериментальные данные. Результаты экспериментов, проведенных в соответствии с многофакторным планом, обрабатывают так, чтобы по измеренным величинам определить коэффициенты уравнения регрессии заранее выбранного вида (обычно полинома) и получить

математическое описание зависимости изучаемых параметров или характеристик объекта (функций отклика) от факторов и их взаимодействий.

Полученные результаты можно использовать при расчете необходимого числа экспериментов, которые предполагают создание принципиально новых высокоэффективных перспективных ЛА с шасси на воздушной подушке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Налимов В.В., Голикова Т.И.* Логические основания планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1976.
2. *Тьюки Дж.* Анализ результатов наблюдений. М.: Мир, 1981.
3. *Мальцев П.М., Емельянова Н.А.* Основы научных исследований. Киев: Вища шк., 1982.
4. *Sidnyaev N.I., Andreytseva K.S.* Independence of the residual quadratic sums in the dispersion equation with noncentral χ^2 -distribution // Applied Mathematics. 2011. Vol. 2. No. 10. P. 1303–1308. DOI: 10.4236/am.2011.210181
5. *Говор С.А.* Анализ влияния определяющих факторов на деструкцию элементов гидротехники в морской воде методами теории планирования эксперимента // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2014-12-1310 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/aero/1310.html>
6. *Драйвер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973.
7. *Михайлов В.И., Федосов К.М.* Планирование экспериментов в судостроении. Л.: Судостроение, 1978. 160 с.
8. *Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М.* Математические методы планирования эксперимента. М.: ДеЛи принт, 2005.
9. *Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т.* Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.
10. *Сидняев Н.И.* Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Изд-во Юрайт, 2014. 495 с.

Говор Светлана Александровна — аспирантка кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Катков Олег Николаевич — научный сотрудник ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского (Российская Федерация, 140180, Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Говор С.А., Катков О.Н. Исследование демонстратора авиационного шасси на воздушной подушке с использованием теории планирования эксперимента // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 136–148.

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-136-148

THE STUDY OF AIR-CUSHIONED AIRCRAFT LANDING GEAR DEMONSTRATOR USING DESIGN OF EXPERIMENTS ALGORITHM

S.A. Govor¹
O.N. Katkov²

Govor_sa@mail.ru
polit-s@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Central Aerohydrodynamic Institute named after professor N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

In this article we consider the design of experiments (DOE) algorithm for an aircraft with landing gear on air cushion. For the purpose of this research we carried out two types of experiments: static and quasi-dynamic. Taking into account the difference of surfaces, this work offers two mathematical models for static and quasi-dynamic events. In order to build multi-factor regression models we conducted 24 experiments for the quasi-dynamic test and 12 for the static test. Further, the parameters of accuracy and adequacy of the non-linear multivariate model of the first order were not sufficient, thus it was necessary to increase the order of polynomials. The higher the order of polynomial approximation is, the more accurate the original mathematical model becomes. For a given air-cushioned aircraft landing gear the second order polynomial was sufficient to verify the reliability of the data obtained

Keywords

Air cushion, air-cushioned landing gear, aircraft, design of experiments (DOE), number of experiments, regression equation

REFERENCES

- [1] Nalimov V.V., Golikova T.I. Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta [The logical basis of experiment design]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976.
- [2] Tukey J. Exploratory data analysis. Addison-Wesley, 1977.
- [3] Mal'tsev P.M., Emel'yanova N.A. Osnovy nauchnykh issledovaniy [Fundamentals of scientific research]. Kiev: Vishcha shk. Publ., 1982.
- [4] Sidnyaev N.I., Andreytseva K.S. Independence of the residual quadratic sums in the dispersion equation with noncentral χ^2 -distribution. *Applied Mathematics*, 2011, vol. 2, no. 10, pp. 1303–1308. DOI: 10.4236/am.2011.210181
- [5] Govor S.A. Impact analysis of the determining factors on the degradation of elements of hydraulic engineering in seawater using methods of the theory of experiment planning. *Jel-ektr. nauchno-tekh. izd. «Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii»* [El. Sc.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2014, iss.12. DOI: 10.18698/2308-6033-2014-12-1310 Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/mathmodel/aero/1310.html>
- [6] Draper N., Smith H. Applied Regression Analysis. N.Y., John Wiley & Sons, 1998.

- [7] Mikhailov V.I., Fedosov K.M. Planirovanie eksperimentov v sudostroenii [Design of experiments in shipbuilding]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 160 p.
- [8] Grachev Yu.P., Plaksin Yu.M. Matematicheskie metody planirovaniya eksperimenta [Mathematical methods of experiment design]. Moscow, DeLi Print, 2005.
- [9] Sidnyaev N.I., Vilisova N.T. Vvedenie v teoriyu planirovaniya eksperimenta [Introduction to the theory of experiment planning]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2011. 463 p.
- [10] Sidnyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh [The experimental design theory and analysis of statistical data]. Moscow, Yurayt Publ., 2014. 495 p.

Govor S.A. — post-graduate student of Higher Mathematics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Katkov O.N. — researcher of Central Aerohydrodynamic Institute named after professor N.E. Zhukovsky (Zhukovsky ul. 1, Zhukovsky, Moscow Region, 140180 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Govor S.A., Katkov O.N. The Study of Air-Cushioned Aircraft Landing Gear Demonstrator using Design of Experiments Algorithm. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 5, pp. 136–148. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-136-148

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 30.09.2016

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 12,95

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тираж 100 экз.