



УДК 629.7.063.017
ГРНТИ 78.25.13

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ АГРЕГАТОВ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

И.И. ЗАВЯЛИК

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Е.В. ФЕТИСОВ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье с использованием имитационного моделирования поставлен и проведен полный факторный эксперимент процесса функционирования агрегата топливной системы авиационного двигателя, в ходе которого выполнена оценка влияния независимых параметров на безотказность агрегата топливной системы воздушного судна. В результате эксперимента получено уравнение регрессии и определены наиболее значимые факторы и их взаимные сочетания, влияющие на уровень безотказности.

Ключевые слова: безотказность; авиационный двигатель; агрегат; полный факторный эксперимент; топливная система.

APPLICATION METHODS OF THE FULL FACTOR EXPERIMENT AT THE AIRCRAFT ENGINE FUEL SYSTEM RELIABILITY EVALUATION

I.I. ZAVYALIK

MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

E.V. FETISOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

The article with the use of simulation delivered and carried out a full factorial experiment of the process of functioning of the unit the fuel system of the aircraft engine in which the estimation of influence of independent parameters on the reliability of Assembly of the fuel system of the aircraft. As a result of the experiment, the regression equation was obtained and the most significant factors and their mutual combinations affecting the level of reliability were determined.

Keywords: reliability; aircraft engine; unit; full factor experiment; fuel system.

Введение. В настоящее время для авиационного двигателестроения особую актуальность приобретают задачи, решение которых позволяет повысить эффективность использования авиационных двигателей (АД) воздушных судов (ВС) по назначению.

Надежность и ресурс современных АД во многом определяется безотказностью в эксплуатации топливной аппаратуры, включающей в себя сложный комплекс агрегатов (насосов, ограничителей частоты вращения, регуляторов подачи топлива, дроссельных кранов, клапанов и т.д.), а также соединяющих трубопроводов, конструктивно-технологическая сложность которых сопоставима с аналогичными характеристиками АД в целом [1].

Поэтому наряду с проблемами повышения безотказности основных узлов АД: компрессора, турбины, камеры сгорания и т.д. немаловажной составляющей проблемы является обеспечение заданного уровня безотказности агрегатов топливной системы (ТС) АД.



Актуальность. В процессе эксплуатации АД под воздействием механических, газодинамических, теплофизических и физико-химических процессов отдельные узлы и детали изменяют свои свойства и, соответственно, изменяются выходные параметры агрегатов ТС. Качественный анализ информации о надежности позволяет установить степень влияния различных отказов и неисправностей на работоспособность отдельных агрегатов или систем в целом, оценить последствия, к которым может привести появление тех или иных неисправностей, выявить основные конструктивно-производственные недостатки, недостатки эксплуатации и ремонта. В тоже время существенное влияние на выходные параметры агрегатов и безотказность ТС АД в целом оказывают внешние факторы. К внешним факторам относятся факторы рабочей среды, факторы загрязнителя, эксплуатационные факторы, конструктивные факторы и другие. Задача усложняется тем, что влияние многих факторов на выходную функцию весьма неоднозначно, и вместе с тем, довольно существенное влияние оказывают их совместное воздействие, парные, тройные и т.п. корреляции.

Сложность современной топливной автоматики АД требует новых методик, позволяющих более полно и качественно оценивать показатели надежности агрегатов ТС на всех этапах жизненного цикла ВС.

Одним из перспективных направлений решения проблемы повышения безотказности и ресурса агрегатов ТС и двигателя в целом является совершенствование и развитие методов контроля ее состояния в процессе эксплуатации. Для этого создаются математические модели, позволяющие количественно оценивать параметры надежности (безотказности) и целенаправленно влиять на них.

Существующие способы решения не дают возможности провести точный расчет в аналитическом виде [2]. Однако, если воспользоваться методами экстремального планирования эксперимента, т.е. представить исследуемый объект в качестве «черного ящика», можно с достаточной степенью точности получить зависимость вероятности безотказности работы агрегата ТС АД $P(t, \Delta)$ от воздействующих факторов. С этой целью в работе поставлен и проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) по центральному композиционному рототабельному плану второго порядка, предложенный Боксом и Уилсоном [3]. Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения с требуемой точностью и достоверностью поставленной задачи. Целью планирования эксперимента, как правило, является получение математической модели исследуемого процесса. Предварительно для уменьшения количества экспериментов по методу Плакетта-Бермана [4] было проведено отсеивание малозначимых факторов. Факторы варьировали на двух уровнях. Интервалы варьирования управляемых факторов и их значения в натуральном масштабе представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни входных факторов и интервалы варьирования

Факторы	Интервал варьирования (Δx_i)	Уровни факторов		
		$x_i = -1$	x_{i0}	$x_i = 1$
Размер частиц загрязнений x_1 , мкм.	5	5	10	15
Коэффициент очистки x_2 .	0,1	0,5	0,6	0,7
Время эксплуатации ВС x_3 , ч.	45	10	55	100

Для ПФЭ, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, число опытов определяется выражением:

$$N = 2^k = 2^3 = 8, \quad (1)$$

где N – число опытов; k – число факторов.



При постановке эксперимента с исследованием взаимного влияния трех факторов понадобится проведение 8 экспериментов. При этом кроме парных, будут учтены и все другие виды корреляций.

Функцией выхода y в данном ПФЭ является вероятность безотказной работы агрегата ТС АД $P(t, \Delta)$, учитывающая изменение качества авиационного топлива в процессе эксплуатации ВС [5]:

$$P(t, \Delta) = P_B(t) \cdot (1 - P_{II}(\Delta)), \quad (2)$$

где $P_B(t)$ – вероятность безотказной работы агрегата ТС АД в период эксплуатации с определенным значением средней наработки на отказ T_{cp} ; $P_{II}(\Delta)$ – вероятность проявления параметрических отказов агрегата ТС АД из-за того, что размер D_q частиц микрозагрязнений, содержащихся в топливе, превысит размер зазора D_s прецизионных пар агрегата.

Главным требованием к модели является способность предсказывать направление дальнейших опытов, причем предсказывать с требуемой точностью. При этом сам эксперимент может быть проведен как на реальном объекте, так и на его математической модели [6]. В теории планирования эксперимента сформулированы требования и условия, которые должны учитываться при выборе зависимых переменных (откликов, выходов, функций цели) и независимых переменных. Зависимая переменная должна быть единственной, однозначной, иметь ясный физический смысл, характеризоваться числом. Таким образом, необходимо с помощью эксперимента, который будет проводиться при неполном знании или незнании механизмов явлений, построить математическую модель, связывающую вероятность безотказной работы агрегатов ТС АД $P(t, \Delta)$, определяемую выражением (2) со всеми переменными (факторами), от которых она зависит.

В соответствии с выбранным планом было выполнено, рандомизировано во времени 8 опытов. Каждый опыт повторялся 3 раза, для этих целей была использована имитационная математическая модель функционирования агрегатов ТС АД с учетом изменения качества авиационного топлива, реализованная в программном продукте MATLAB Simulink [7].

Математическая модель после реализации опытов ПФЭ имеет вид:

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

где y – функция выхода; x_i, x_j, \dots, x_n – управляющие факторы; b_i, b_j, \dots, b_n – коэффициенты регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели была построена расширенная матрица планирования и результатов эксперимента (табл. 2).

Таблица 2 – Расширенная матрица плана 2^3 и результатов опыта

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов \bar{y}_j
	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	
1	+	+	+	+	+	+	+	0,827	0,841	0,843	0,837
2	-	+	+	-	-	+	-	0,787	0,777	0,758	0,774
3	+	-	+	-	+	-	-	0,788	0,825	0,831	0,815
4	-	-	+	+	-	-	+	0,726	0,705	0,682	0,704
5	+	+	-	+	-	-	-	0,845	0,839	0,846	0,843
6	-	+	-	-	+	-	+	0,826	0,823	0,822	0,824
7	+	-	-	-	-	+	+	0,837	0,819	0,84	0,832
8	-	-	-	+	+	+	-	0,82	0,811	0,809	0,813



Впоследствии, изучая полученную полиномиальную модель (3), можно на основании некоторых математических критериев оценки, достаточно четко судить об их адекватности или неадекватности ее реально происходящим процессам. Подобная модель позволяет говорить о том, сколь велико влияние отдельных факторов на систему, а также их взаимное влияние.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле:

$$b_o = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j; \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j. \quad (4)$$

В результате реализации двухуровневой трехфакторной модели ПФЭ и определения статистической значимости каждого из 8 коэффициентов уравнение регрессии (3) приняло вид:

$$y = 0,889 - 0,007x_1 - 0,113x_2 - 0,004x_3 + 0,014x_1x_2 + 0,0002x_1x_3 + 0,004x_2x_3 - 0,0002x_1x_2x_3, \quad (5)$$

Проверка воспроизводимости эксперимента определена при помощи критерия Кохрена, а степень значимости коэффициентов, проведенная по критерию Стьюдента с использованием параллельных опытов, показала значимость всех коэффициентов полученного уравнения [8]. При этом гипотеза об адекватности математической модели (5) по критерию Фишера [3] при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Далее получаем графические зависимости влияния варьируемых факторов на вероятность безотказной работы агрегата ТС АД ВС.

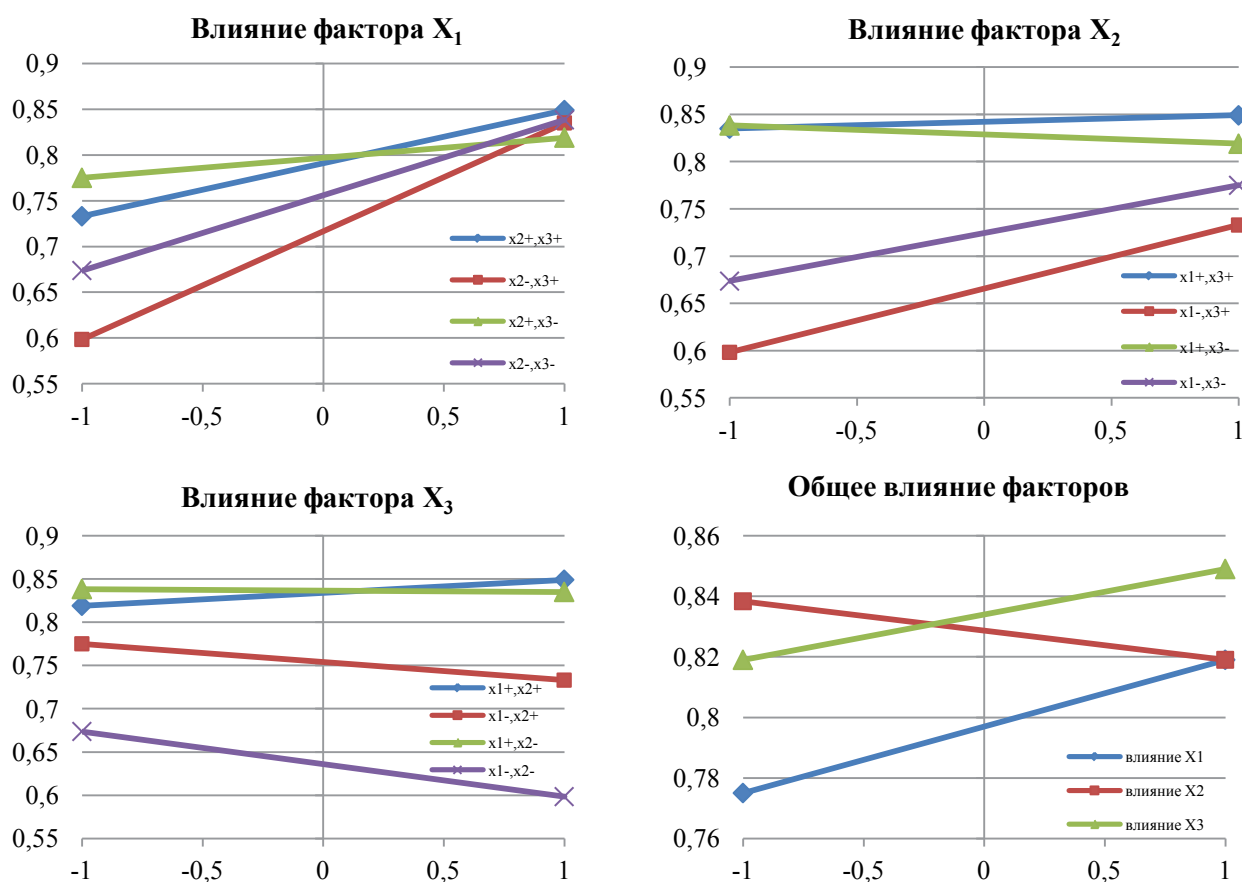


Рисунок 1 – Графические зависимости влияния факторов на вероятность безотказной работы агрегата ТС АД ВС



Из представленных на рисунке 1 зависимостей видно, что вероятность безотказной работы агрегата ТС АД $P(t, \Delta)$ возрастает с увеличением размера частиц загрязнений (X_1) и коэффициента очистки авиационного топлива (X_2), что объясняется, во первых, взаимодействием частиц загрязнений с поверхностями трущихся деталей прецизионных пар агрегатов топливной автоматики [5], а ,во вторых, тонкостью фильтрации устройств очистки авиационного топлива, применяемых в ТС ВС. В то же время при малых значениях фактора (X_3) вероятность безотказной работы $P(t, \Delta)$ агрегата ТС АД довольно высока, что наблюдается при любых сочетаниях прочих параметров.

Выводы. Таким образом, использование разработанной математической модели при проведении исследований безотказности агрегатов топливной системы с расширением диапазонов значений входных параметров (внешних факторов) и внутренних параметров системы (агрегатов топливной системы авиационного двигателя) позволяет получить достоверную оценку уровня безотказности агрегатов топливной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халфун Л.М., Попов В.Г., Силуянова М.В. Топливная аппаратура авиационных газотурбинных двигателей: Монография. – М.: МАТИ 2002. – 360 с.
2. Литвинов Ю. А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 288 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 282 с.
4. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов – М.: Мир, 1997. – 278 с.
5. Тимеркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
6. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Metallurgia, 1981. – 151 с.
7. Расчет рабочих параметров агрегатов топливной системы силовой установки летательного аппарата с учетом определения значений показателей качества авиационного топлива. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Завялик И.И., Фетисов Е.В., Верещагин Ю.О. Свидетельство № 2017615419 от 17.05.2017 г.
8. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Metallurgia, 1969. – 287 с.

REFERENCES

1. KHalfun L.M., Popov V.G., Siluyanov M.V. Toplivnaya apparatura aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelej: Monografiya. – M.: MATI 2002. – 360 s.
2. Litvinov YU. A., Borovik V.O. KХarakteristiki i ehkspluatatsionnye svojstva aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelej. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 288 s.
3. Adler YU.P., Markova E.V., Granovskij YU.V. Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovij. – M.: Nauka, 1976. – 282 s.
4. KHartman K. Planirovanie ehksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov – M.: Mir, 1997. – 278 s.
5. Timerkeev R.G., Sapozhnikov V.M. Promyshlennaya chistota i tonkaya fil'tratsiya rabochikh zhidkostej letatel'nykh apparatov. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 152 s.
6. Nalimov V. V., Golikova T. I. Logicheskie osnovaniya planirovaniya ehksperimenta. – M.: Metallurgiya, 1981. – 151 s.



7. Raschet rabochikh parametrov agregatov toplivnoj sistemy silovoj ustanovki letatel'nogo apparata s uchetom opredeleniya znachenij pokazatelej kachestva aviatsionnogo topliva. Svi-detel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EHVM: Zavyalik I.I., Fetisov E.V., Vereshhagin YU.O. Svidetel'stvo № 2017615419 ot 17.05.2017 g.

8. Adler YU. P. Vvedenie v planirovanie ehksperimenta. – M.: Metallurgiya, 1969. – 287 s.

© Завялик И.И., Фетисов Е.В., 2018 г

Фетисов Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, врио заместителя начальника 71 кафедры инженерно-авиационного обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mg_907@mail.ru

Завялик Иван Иванович, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, zavyalik26@yandex.ru