

вводится вариативный модуль функционально-ориентированных дисциплин общепрофессиональной подготовки, а специализация студентов начинается уже с третьего курса.

Таким образом, в сфере организационно-методического обеспечения учебного процесса имеет место широкий спектр видов интеграционных связей и форм взаимодействия предприятий и университета.

Опыт практической реализации системы целевой функционально-ориентированной подготовки специалистов на крупнейших предприятиях Поволжского региона показывает, что она позволяет в 1,5 – 3 раза сократить сроки трудовой и психологической адаптации молодых специалистов и их доучивания в производственных коллективах, существенно повысить производительность инженерного труда и уменьшить суммарные издержки на подготовку и послевузовское доучивание инженерных кадров, практически исключить миграцию специалистов из-за их неудовлетворенности содержанием труда, значительно поднять уровень профессиональной заинтересованности студентов и усилить индивидуализацию обучения в вузе. При этом наибольший эффект от взаимодействия предприятий и университета достигается на таком уровне их организационно-методических связей, когда вуз и предприятие становятся стратегическими партнерами в реализации корпоративных программ подготовки кадров и повышения квалификации персонала предприятия.

МНОГОФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Гишваров А.С., Зырянов А.В., Максимов М.А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Практический опыт показывает, что применение методов планированного эксперимента позволяет повысить эффективность экспериментальных исследований, требующих больших материальных затрат и длительных сроков. Особенно значителен эффект при изучении сложных многофакторных процессов. К ним относятся, например, термогазодинамические процессы, протекающие в авиационных ГТД, процессы расходования ресурса их элементов, узлов, агрегатов, систем и т.п.

В довольно обширной литературе по планированию эксперимента основное внимание уделяется исследованию статических процессов и мало внимания уделено планированию фактора времени, в то время как в задачах исследования авиационных ГТД время выступает как главный

фактор. Например, функцией времени являются характеристики надежности, переходные процессы (запуск двигателя и приемистость) также включают фактор времени. Во многом это объясняется тем, что теория планирования эксперимента бурно развивалась для решения экстремальных задач главным образом в химии, металлургии и физике.

Наличие в моделях исследуемых процессов фактора времени существенно усложняет процесс выбора оптимального плана экспериментов. При этом принципиально возможны следующие варианты планирования эксперимента:

- время используется в качестве отдельного фактора и принимает различные значения в разных опытах эксперимента ($\Delta\tau_{оп.i} = var$, где $\Delta\tau_{оп.i}$ – длительность проведения i -го опыта в эксперименте);

- время во всех опытах эксперимента выдерживается одинаковым, а его значение выбирается в зависимости от условий проводимого исследования ($\Delta\tau_{оп.i} = idem$);

- время выбирается в зависимости от изменения выходного параметра Π в эксперименте ($\Delta\tau_{оп.i} = f(\Delta\Pi)$);

- при исследовании прочностной надежности изделий время совпадает с длительностью испытаний до разрушения или наступления параметрического отказа τ^* ($\Delta\tau_{оп} = \tau^*$).

При ограниченной информации (или ее отсутствии) о виде модели исследуемого процесса на практике часто применяются планы первого порядка и композиционные планы второго порядка, рассматривая в качестве моделей полиномы вида

$$\Pi = a_0 + \sum_{i=0}^n a_i R_i + a_\tau \tau + \sum_{ij=1}^n a_{ij} R_{ij} + \sum_{i=1}^n a_{\tau i} R_i \tau; \quad (1)$$

$$\Pi = a_0 + \sum_{i=0}^n a_i R_i + a_\tau \tau + \sum_{ij=1}^n a_{ij} R_i R_j + \sum_{i=1}^n a_{\tau i} R_i \tau + \sum_{i=1}^n a_{ii} R_i^2 + a_{\tau\tau} \tau^2, \quad (2)$$

где a_i – коэффициенты регрессии модели; R_i – факторы исследуемого процесса; τ – время.

При этом длительность опытов в эксперименте непостоянна: $\tau_{оп.i} = var$; $T = \sum_i \tau_{оп.i}$ (где $\tau_{оп.i}$ – длительность i -го опыта; T – общая длительность эксперимента). Следует отметить, что в выражениях (1) и (2) время τ отделено от других факторов R_i . Это сделано специально из-за специфики исследования динамических процессов.

Возможен также случай планирования эксперимента когда фактор времени исключен из правой части регрессионных моделей (1) и (2). В этом случае выходной величиной исследуемого процесса является скорость изменения параметра, т.е. вместо моделей вида (1) и (2) рассматри-

ваются модели вида

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = \sum_{i=0}^n a_i R_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} R_{ij}; \quad \tau_{\text{оп.}i} = \text{idem}; \quad T = N\tau_{\text{оп}}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = \sum_{i=0}^n a_i R_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} R_i R_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} R_i^2. \quad (4)$$

Целью данной работы является исследование целесообразности включения времени в качестве дополнительного фактора в планы первого порядка и композиционные планы второго порядка.

Когда время включено в план эксперимента как фактор и максимальная длительность в каждом опыте плана не превышает t единиц, то расчет общей длительности эксперимента проводится следующим образом. Рассмотрим для примера ортогональный план размерности «3». Для его реализации необходимо $N = 2^k + 2k + 1 = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15$ опытов. Данный план требует проведения четырех опытов, в которых фактор времени находится на уровне -1 , четырех опытов, в которых фактор времени находится на уровне 1 , пяти, в которых фактор времени находится на уровне 0 , и по одному опыту, в которых фактор времени находится соответственно на уровне $1,215$ и $-1,215$. Отсюда длительность эксперимента составит

$$T = 4 \cdot 0,91t + 4 \cdot 0,09t + 5 \cdot 0,5t + t = 7,5t.$$

Аналогичным образом определяется длительность эксперимента для других планов и любого числа факторов.

Исследования, проведенные для планов первого порядка, показывают (табл. 1, рис. 1), что длительность экспериментального исследования, по сравнению со случаем, когда время не включено в план эксперимента, сокращается в среднем на 6%, а количество потребных опытов в эксперименте увеличивается в среднем на 95%.

Максимальное сокращение длительности эксперимента (20%) и минимальное увеличение количества потребных опытов (66%) имеет дробный факторный план для числа факторов $k = 2$. Однако уже при $k = 7$ сокращение длительности эксперимента составляет всего 0,7%, а количество потребных опытов увеличивается на 99% (т.е. ≈ 2 раза).

Таким образом, сокращение длительности эксперимента на один процент влечет за собой увеличение количества опытов на 15%.

Для композиционных планов второго порядка (рис. 2) длительность эксперимента сокращается в среднем на 23%, а количество опытов увеличивается в среднем на 65%. Этот вывод хорошо согласуется с известным положением теории надежности о том, что для сокращения длительности испытаний изделий на надежность необходимо увеличивать число испытываемых изделий и наоборот.

Таблица 1

Наименование плана	Число факторов	Общая длительность эксперимента Т		Количество опытов в эксперименте N	
		Время включено как фактор	Время const для каждого режима	Время включено как фактор	Время const для каждого режима
Планы первого порядка					
ПФЭ	2	4,5 (11%)	5	9(80%)	5
ДФЭ		2,5(20%)	3	5(66%)	3
ПФЭ	3	8,5 (6%)	9	17(88%)	9
ДФЭ		4,5(11%)	5	9(80%)	5
ПФЭ	4	16,5 (3%)	17	33(94%)	17
ДФЭ		8,5(6%)	9	17(88%)	9
ПФЭ	5	32,5 (1,5%)	33	65(96%)	33
ДФЭ		16,5(3%)	17	33(94%)	17
ПФЭ	6	64,5 (0,7%)	65	129(98%)	65
ДФЭ		32,5(1,5%)	33	65(96%)	33
ПФЭ	7	128,5 (0,3%)	129	257(99%)	129
ДФЭ		64,5(0,7%)	65	129(98%)	65
Планы второго порядка					
Ортогональный	2	7,5 (20%)	9	15 (66,6%)	9
Ротатабельный		10,0 (30%)	13	20 (53,8%)	13
Хартли		5,5 (27%)	7	11(57%)	7
Ортогональный	3	12,5 (20%)	15	25 (66,6%)	15
Ротатабельный		15,5 (29%)	20	31 (55%)	20
Хартли		8,5(29,4)	11	17(54,5%)	11
Ортогональный	4	21,5 (16,2%)	25	43 (72%)	25
Ротатабельный		26,0 (19,2%)	31	52 (67,7%)	31
Хартли		13,5 (26%)	17	27(59%)	17
Ортогональный	5	38,5 (11,8%)	43	77 (80%)	43
Ротатабельный		45,5 (14,7%)	52	91 (75%)	52
Хартли		14,5(86,2%)	27	29(7,4%)	27
Ортогональный	6	71,5 (7,7%)	77	143	77
Ротатабельный		81,5 (11,6%)	91	(85,8%)	91
Хартли		23,5 (23,4%)	29	163 (80%)	29
Ортогональный	7	136,5 (4,7%)	143	273	143
Ротатабельный		136,5 (19%)	163	(90,9%)	163
Хартли		40,5(16%)	47	273	47
				(67,4%)	
				81(72,3%)	

Примечание: ПФЭ – полный факторный эксперимент; ДФЭ – дробный факторный эксперимент. В процентах указана эффективность эксперимента при включении фактора времени в регрессионную модель.

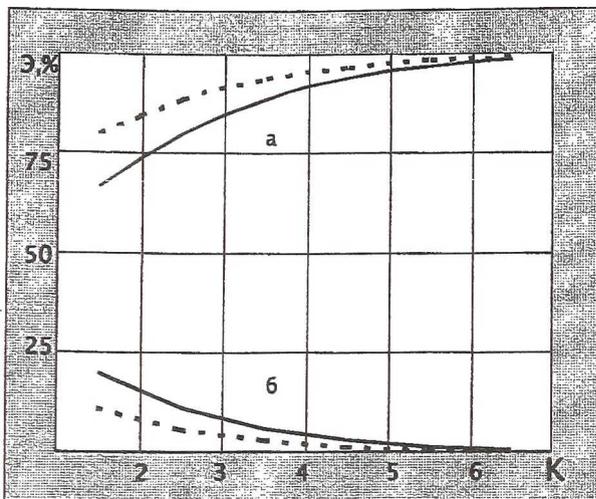


Рис. 1. Влияние количества факторов K на эффективность планов первого порядка: а — проигрыш по количеству опытов; б — выигрыш по времени; Э — эффективность в %, - ПФЭ, — - ДФЭ

Максимальный выигрыш по времени (86,2%) и минимальный проигрыш в количестве опытов (7,4%) имеет план Хартли с числом факторов $k = 5$ (объясняется тем, что при $k \geq 5$ планы Хартли строятся на основе реплик типа 2^{k-n}).

Для остальных планов выигрыш во времени с увеличением числа факторов уменьшается, а проигрыш по количеству опытов увеличивается. Так для ортогонального плана при $k=2$ продолжительность эксперимента сокращается на 20%, при $k=7$ это сокращение составляет всего 4,7%, а проигрыш по количеству опытов при $k=2$ составляет 66,6% (при $k=7$ он достигает 91%). Все это указывает на нецелесообразность включения фактора времени в план эксперимента в качестве дополнительного фактора, т.е. необходимо проводить исследование скорости изменения параметра процесса.

При планировании таких испытаний необходимо выбрать количество интервалов испытаний, их длительности и режимы на каждом интервале.

Положим, что задана длительность T эксперимента для некоторого объекта. Под T будем понимать наработку объекта, в течение которой он функционирует.

Рассмотрим следующие стратегии проведения эксперимента и методы оценки скорости изменения параметра объекта.

1. Измеряют значение параметра в начале и в конце интервала

времени T , в течение которого объект непрерывно функционирует при неизменном режиме; оценку \hat{v} скорости изменения параметра определяют по формуле

$$\hat{v} = \frac{\tilde{y}(\tau_0 + T) - \tilde{y}(\tau_0)}{T}, \quad (5)$$

где $\tilde{y}(\tau_0)$ и $\tilde{y}(\tau_0 + T)$ - результаты измерения параметра в начале и конце интервала испытаний.

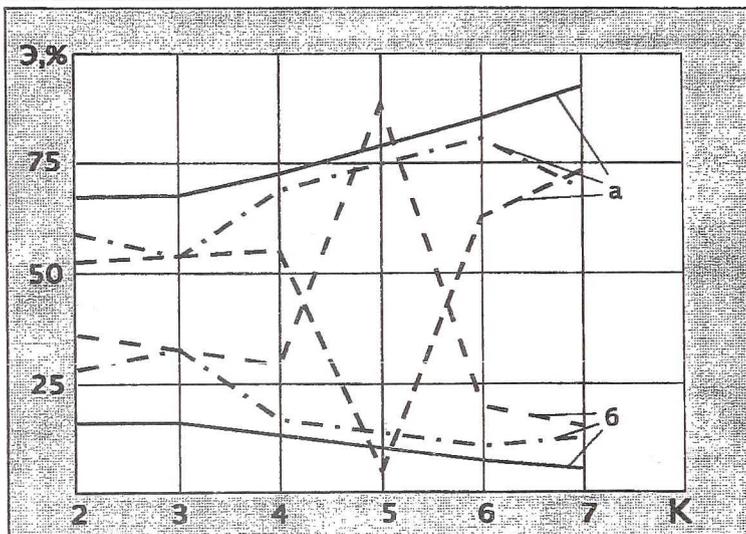


Рис 2. Влияние количества факторов K на эффективность планов второго порядка: а – проигрыш по количеству опытов в эксперименте; б – выигрыш по времени; Э – эффективность в %, ——— - ортогональный план, - - - - - план Хартли, - · - · - · - ротатабельный план

2. В ходе испытаний, длящихся непрерывно в течение времени T , осуществляют периодическое (через интервалы Δt) измерение параметра объекта; обозначим результаты измерений через

$$\tilde{y}(0), \tilde{y}(1), \dots, \tilde{y}(2k-1) \text{ (общее число измерений составляет } 2k);$$

оценку \hat{v} скорости изменения параметра определяют методом взвешенных наименьших квадратов из условия

$$\min_{y^{(0)}, v} (\tilde{Y} - Y)^T W^{-1} (\tilde{Y} - Y), \quad (6)$$

где \tilde{Y} вектор столбец результатов измерения параметра с элементами $\tilde{y}(0), \tilde{y}(1), \dots, \tilde{y}(2k-1)$; Y вектор столбец результатов расчета значения

параметра по модели $y(i) = y(0) + v_i \Delta t$, $i = 0, 1, \dots, 2k-1$;

W – ковариационная матрица случайной составляющей результатов наблюдений.

3. Общее время испытаний T разбивают на k равных периодов $\Delta \tau$, которые разносят во времени; измеряют значение параметра в начале и в конце каждого периода; результаты оценки скорости, полученные по каждому периоду, усредняют при этом

$$\hat{v} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\tilde{y}(\tau_{ик}) - \tilde{y}(\tau_{ин})}{\Delta \tau}, \quad (7)$$

где $\tilde{y}(\tau_{ик})$ и $\tilde{y}(\tau_{ин})$ – результаты измерения параметра в конце и начале i -го периода.

При использовании стратегий 2 и 3 общее число измерений параметра одинаково и равно $2k$, а длины периодов $\Delta \tau$ (при одинаковой длительности испытаний T) различны. В общем случае при числе измерений равном $2k$ количество периодов при использовании стратегии 3 может быть меньше k . Тогда для каждого периода оценку скорости следует вычислять из условия (6), а затем определять средневзвешенную скорость, усредняя полученные оценки с весами, обратно пропорциональными дисперсиям оценок.

Следует отметить, что в каждом конкретном случае выбор способа учета фактора времени требует дополнительного анализа.

По результатам данного исследования была разработана методика выбора оптимальных планов эксперимента при исследовании моделей динамики. Практическая реализация методики проведена на примере генератора постоянного тока ГС-12ТО, устанавливаемого на вспомогательном газотурбинном двигателе ТА-6А. Исследовался процесс износа щеток данного генератора (износ ведет к снижению мощности генератора и, как следствие, к отказу двигателя по причине его незапуска). Материал щеток графит марки МГС-7. Износ щеток Δh зависит от многих факторов: шероховатости, удельной нагрузки, площади контакта, вибрации, биения, силы тока, температуры, частоты вращения, влажности воздуха. В данном исследовании, с учетом реальных возможностей испытательного оборудования в качестве варьируемых параметров были выбраны:

- удельное давление в контакте (P), регулируемое площадью контакта (S);
- ток нагрузки (I), регулируемый нагрузкой генератора (N), что позволило свести модель износа к виду

$$\frac{\Delta h}{\Delta \tau} = f(P, I) = f(S, N).$$

Для обеспечения максимальной точности модели и сокращения длительности эксперимента время включено в план испытаний в качестве фактора.

Поскольку вид функционала f априорно был неизвестен, учитывая нелинейную зависимость износа от перечисленных факторов, в качестве модели рассматривался полином второго порядка:

$$\Delta h = a_0 + a_1 S + a_2 N + a_3 \tau + a_{12} SN + a_{13} S\tau + a_{23} N\tau + a_4 S^2 + a_5 N^2 + a_6 \tau^2,$$

где a_0, a_1, \dots, a_6 - коэффициенты модели.

Оптимизация плана проводилась с учетом D -критерия оптимальности. Эксперимент проводился на двигателе ТА-6А. Обработкой данных эксперимента были определены константы модели:

$$a_0 = -0,274; a_1 = -4,959 \cdot 10^{-4}; a_2 = 0,1275; a_3 = 0,02586; \\ a_{12} = -1,4618 \cdot 10^{-3}; a_{13} = -1,9866 \cdot 10^{-3}; a_{23} = 2,5447 \cdot 10^{-3}; a_4 = -6,1513 \cdot 10^{-3}; \\ a_5 = -8,2223 \cdot 10^{-3}; a_6 = 1,2766 \cdot 10^{-3}.$$

Проверка модели по критерию Фишера подтвердила ее адекватность.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В СИСТЕМЕ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Гишваров А.С., Масленников В.А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Известно, что потребительские качества изделий авиационной техники, включая авиационные ГТД, закладываются при проектировании, отрабатываются на стадии доводки, обеспечиваются в серийном производстве и реализуются в эксплуатации. Неотъемлемой частью всех этапов жизненного цикла ГТД являются ресурсные испытания. Очевидно, что от объема, режимов и длительности испытаний зависит достоверность оценки надежности ГТД и, как следствие, технико-экономический эффект от их эксплуатации.

В общем случае, выбор параметров ресурсных испытаний авиационных ГТД (периодических, технологических, доводочных и др., включая как длительные, так и ускоренные) в системе жизненного цикла является крайне сложной задачей, поскольку для таких технических систем как авиационные ГТД невозможно построить описание жизненного цикла в замкнутой аналитической форме ввиду того, что процессы функционирования, расходования ресурса, оценки состояния двигателя в испытаниях и