

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

др. описываются трансцендентными уравнениями, т.е. аналитическое решение задачи становится невозможным. Как правило, в таких случаях известно только как функционирует система или как она должна функционировать, если речь идет о вновь создаваемом двигателе. В данной ситуации возможно построение только имитационной модели «перемещения» двигателя по основным этапам своего жизненного цикла. Структура и содержание имитационной модели зависят от особенностей решаемой задачи с применением испытаний. В общем случае, имитационная модель включает такие этапы жизненного цикла изделия как проектирование, доводка, серийное производство, эксплуатация и ремонт, в частном случае, например, для серийно выпускаемого изделия - этапы производства, испытаний и эксплуатации.

Этап производства в модели предназначен для моделирования качества изготовления двигателя, характеризуемого совокупностью параметров P_{oi} ($i = \overline{1, v}$). Фактически вектор $P_0 = [p_{o1}, \dots, p_{ov}]^T$ описывает начальное состояние двигателя перед испытаниями (эксплуатацией).

Этап испытаний в модели предназначен для имитации испытаний $N_{и}$ двигателей, включая имитацию режимов $R_{и\zeta}(\tau_{и\zeta})$ и длительность $\tau_{и\zeta}$ нагружения ($\zeta = \overline{1, N_{и}}$). В более общей постановке, в перечень оптимизируемых могут быть включены и другие параметры, влияющие на эффективность системы испытаний:

- параметры системы отбора и подготовки двигателей к испытаниям $C_{оп} = [c_{оп1}, \dots, c_{опv}]^T$;

- параметры системы контроля, приемки и отгрузки двигателей $C_{кпо} = [c_{кпо1}, \dots, c_{кпо\zeta}]^T$;

- параметры качества применяемого испытательного оборудования $C_0 = [c_{o1}, \dots, c_{om}]^T$ и др.

Результатом моделирования на данном этапе является оценка надежности и ресурса испытанного двигателя, являющаяся основой для принятия решения, например, об отгрузке или браковке партии двигателей, в зачет которых проводились испытания.

Этап эксплуатации в модели предназначен для имитации влияния условий окружающей среды на $N_{э}$ двигателей, эксплуатируемых в режимах $R_{эк}(\tau_{эк})$ длительностью $\tau_{эк}$ ($k = \overline{1, N_{э}}$) в соответствии с выбранной стратегией эксплуатации (по фиксированному ресурсу, по состоянию, по комбинированному варианту). Входными параметрами на данном этапе являются количество $N_{э}$ и качество $P_{ок}$ двигателей. Результатом моделирования являются параметры, характеризующие конечный эффект от эксплуатации двигателей: затраты и доход от эксплуатации, вероятность выполнения двигателем (в системе летательного аппарата) своих функций и др.

Ресурсные испытания как сложная система характеризуются многими показателями и, в частности, при оптимизации таких параметров испытаний как объем, режимы и длительность испытаний используются следующие показатели (критерии):

- эквивалентность испытательного и эксплуатационного циклов нагружения, т.е. равенство повреждаемости основных “критичных” элементов узлов двигателя, определяющих его надежность и ресурс (показатель K_1);

- длительность испытаний (показатель K_2);

- объем испытываемых двигателей (показатель K_3).

В более сложных случаях, когда рассматриваются двигатели многовариантного применения, учитываются критерий гарантированной проверки надежности двигателя (показатель K_4) и критерий дифференцированного «зачета» в испытаниях эксплуатационных вариантов применения двигателя (показатель K_5).

Очевидно, что достоверность выбора параметров ресурсных испытаний во многом зависит от уровня обоснованности имитационной модели, т.е. адекватности реальному жизненному циклу двигателя. Основными принципами, с применением которых формируется имитационная модель, являются принципы:

- информационной достаточности;
- параметризации;
- интегрирования;
- осуществимости;
- рационального использования факторного пространства;
- множественности моделей.

Комплексная оптимизация испытаний имитационным моделированием жизненного цикла изделия невозможна без оценки эксплуатационной повреждаемости “критичных” элементов двигателя. В общем случае, эксплуатация определенной партии (парка) двигателей протекает в некоторой области режимов нагружения и условий окружающей среды, соответствующих техническим условиям на эксплуатацию двигателей. Поэтому при оптимизации ресурсных испытаний необходимо выбрать правило оценки повреждаемости внутри данной области. Принципиально возможны следующие методы имитационного моделирования и оценки эксплуатационной повреждаемости:

1. Формируется матрица повреждаемости $\Pi_{Эн, N_3}^{мод(1)}$ размерности $N_3 \times n$ с учетом N_3 траекторий нагружения $[R_3(\tau_3), \tau_3]$ двигателя и n “критичных” элементов, которые непосредственно используются в имитационной модели;

2. Формируется матрица повреждаемости $\Pi_{Эн, N_{вар}}^{мод(2)}$ размерности $N_{вар} \times n$ с

учетом $N_{\text{вар}}$ априорно заданных вариантов применения двигателя в эксплуатации (например, для ВГТД ТА-6А таких вариантов 4 и обусловлены они особенностями летательных аппаратов, на которые данный двигатель устанавливается);

3. В имитационной модели формируется вектор повреждаемости элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(3)}$ размерности $1 \times n$, соответствующий повреждаемости “критичных” элементов с учетом вероятности использования двигателя в каждом из $N_{\text{вар}}$ вариантов применения;

4. В имитационной модели формируется вектор повреждаемости “критичных” элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(4)}$ размерности $1 \times n$, соответствующий максимальным из $N_{\text{вар}}$ вариантов значениям;

5. Формируемый в имитационной модели вектор повреждаемости “критичных” элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(5)}$ размерности $1 \times n$ соответствует средним эксплуатационным значениям;

6. В имитационной модели формируется вектор повреждаемости элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(6)}$ размерности $1 \times n$, соответствующий «осредненным» по вариантам применения значениям повреждаемости элементов двигателя;

7. Формируемый в имитационной модели вектор повреждаемости элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(7)}$ размерности $1 \times n$ соответствует максимальной из $N_{\text{Э}}$ суммарной повреждаемости;

8. Аналогично п. 7 в имитационной модели формируется вектор повреждаемости элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(8)}$, но при этом учитывается значимость последствий отказа или разрушения “критичных” элементов двигателя, задаваемая весовыми коэффициентами γ_i ($\sum \gamma_i = 1$);

9. Формируемый в имитационной модели вектор повреждаемости “критичных” элементов двигателя $\Pi_{\text{Эп}}^{\text{мод}(9)}$ размерности $1 \times n$ соответствует максимальным эксплуатационным значениям.

Сравнительная оценка эффективности перечисленных методов оценки эксплуатационной повреждаемости двигателя проводилась по показателю прибыли от эксплуатации и длительности испытаний при имитационном моделировании жизненного цикла вспомогательного газотурбинного двигателя ТА-6А. При этом учитывались элементы двигателя, имеющие наименьший расчетный запас по надежности и ресурсу: рабочая лопатка 1-й ступени турбины; радиально-упорный подшипника ротора; ведущая шестерня редуктора; подшипник вентилятора, охлаждающего генераторы и масляный радиатор; генераторы постоянного и переменного токов.

Условия и режим нагружения двигателя задавались:

- температурой воздуха на входе в двигатель $t_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$;
- частотой вращения ротора n , %;

- количеством воздуха, отбираемого за компрессором $G_{отб}$, кг/с;
- расходом воздуха через вентилятор $G_{вент}$, кг/с;
- загрузкой генераторов постоянного $N_{Г1}$ и переменного $N_{Г2}$ токов, кВт.

Область реализации режима нагружения двигателя в испытаниях соответствовала ограничениям:

$$80 \leq n \leq 102\%; \quad 0 \leq t_H \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}; \quad 0,7 \leq G_{отб} \leq 1,4 \text{ кг/с};$$

$$0 \leq N_{Г1} \leq 16 \text{ кВт}; \quad 0 \leq N_{Г2} \leq 100 \text{ кВА}; \quad 0,5 \leq G_{вент} \leq 1,0 \text{ кг/с}.$$

Имитационная модель жизненного цикла двигателя включала этапы «производство», «испытания» и «эксплуатация».

Сравнение эффективности показало (табл. 1), что при предельно допустимой «невязке» по повреждаемости «критичных» элементов двигателя, равной 20%:

- методы 1 ... 3, 5 ... 9 по эффективности, оцениваемой прибылью, являются примерно одинаковыми (отличие составляет 1,5 %);
- при моделировании эксплуатации методами 4 и 6 испытания приносят убытки ($Pr << 0$) (причиной этому является необоснованная браковка двигателей по результатам испытаний, т.к. данные методы имитируют работу двигателя в «перегруженном» варианте в течение всего ресурса);
- длительность ресурсных испытаний является наименьшей при моделировании эксплуатации методом 9.

Таблица 1

Показатели эффективности	Эффективность испытаний при различных методах моделирования эксплуатации								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность испытаний $t_{и}^*$, час	4736	168	003	673	002	090	272	396	857
Прибыль Pr^* , млн.руб.	383,6	84,9	88,1	715,8	82,2	715,6	84,5	85,2	84,8

Таким образом, для практического применения более предпочтительен 9-й метод моделирования эксплуатации (циклы нагружения двигателя, соответствующие оптимальному варианту ресурсных испытаний приведены на рис. 1). При этом на испытания устанавливается один двигатель ($N_{и} = 1$).

Представляло интерес проведение сравнительной оценки эффективности программ опытных ресурсных испытаний (обоснование кото-

рых проведено с применением имитационного моделирования) и серийных эквивалентно-циклических испытаний рассматриваемого двигателя.

Серийная программа ресурсных эквивалентно-циклических испытаний предназначена для подтверждения ресурса 2000 часов и 3000 запусков. При этом испытываются два двигателя ($N_H = 2$). Характеристика программы испытаний приведена в табл. 2.

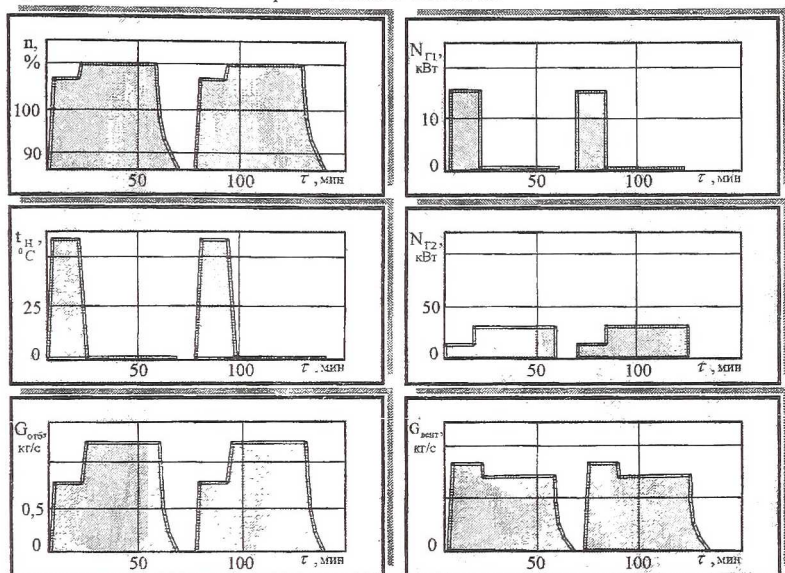


Рис. 1. Оптимальные циклы нагружения двигателя в ресурсных испытаниях ($N_H = 1$)

Таблица 2

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Количество циклов	7500	Режимная наработка за 1 этап, час	5
Длительность цикла, мин	21	Общая наработка за 1 этап, час	6,5
Режимная наработка за 1 цикл, мин	10	Количество этапов	120
Общая наработка за 1 цикл, мин	13	Режимная наработка за испытания, час	606
Количество циклов в этапе	30	Общая наработка за испытания, час	786
Длительность этапа, мин	630	Суммарное время испытаний, час	1266

двух случаев:

- при одинаковом значении (для опытных и серийных испытаний) предельно допустимой «невязки» по повреждаемости “критичных” элементов двигателя $(\delta\Pi^*_{\zeta_i})_{оп} = (\delta\Pi^*_{\zeta_i})_{сер} = 20\%$. Сравнение эффективности при этом проводилось по длительности испытаний;

- при одинаковой длительности опытных и серийных испытаний $(\tau_{и.оп} = \tau_{и.сер})$. Сравнение эффективности при этом проводилось по значениям «невязок» по повреждаемости “критичных” элементов двигателя.

Статистическое рассеяние параметров начального состояния элементов двигателя моделировалось соответствующими законами распределения в пределах допуска на изготовление $(P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0v}]^T \in P_{0.TV})$.

Имитировалась эксплуатация 200 двигателей по фиксированному ресурсу.

Таблица 3

Сравнительная оценка эффективности программ серийных и опытных ресурсных испытаний двигателя

Наименование программы испытаний	Средняя «невязка» по повреждаемости, %			Длительность испытаний, час			Прогнозируемая прибыль от эксплуатации, млн. руб.		
	min	max	МО	min	max	МО	min	max	МО
Серийная	20,8	33,6	27,3			780	374,7	406,7	387,6
Опытная $(\delta\Pi_{\zeta_i})_{оп} =$ $(\delta\Pi_{\zeta_i})_{сер}$	20,8	33,6	27,4	598	699	642	376,6	402,5	386,2
Опытная $\tau_{и.оп} =$ $\tau_{и.сер}$	12,6	19,1	15,8	780	780	780	378,7	408,8	388,5

Примечание: “min”, “МО”, “max” – наименьшее, среднее и наибольшее значения величины

Результаты исследования, приведенные в табл. 3, показывают, что применение имитационного моделирования позволило в данном случае повысить уровень эквивалентности испытаний по сравнению с серийными испытаниями в 1,7 раз и сократить их длительность в 1,2 раза.