

М. Н. Давыдов, Г. К. Агеев, Г. И. Сахибгареева

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решается задача моделирования и оптимизации ресурсных испытаний двигателей с применением имитационного моделирования. *Двигатель; моделирование; оптимизация; эффективность; планирование эксперимента*

Практика показывает, что применение имитационного моделирования является эффективным средством снижения затрат и сроков при решении задач оценки надежности и ресурса сложных технических систем типа авиационных ГТД.

В общем случае имитационная модель двигателя включает такие этапы, как проектирование, доводка, испытания, производство, эксплуатация и ремонт.

В условиях серийного производства для определения влияния эффективности ресурсных испытаний на технико-экономический эффект от эксплуатации изделия достаточно рассматривать имитационную модель вида «производство – испытания – эксплуатация», а для проектируемого изделия модель вида – «проектирование – доводка – производство – испытания – эксплуатация».

Очевидно, что уровень детализации имитационной модели производства двигателя зависит от объема располагаемой информации и основной цели проводимого исследования. При этом основными исходными данными являются: средние (по техническим условиям) и предельно допустимые значения отклонений параметров, влияющих на надежность и ресурс двигателя, а также законы распределения параметров; затраты на производство, связанные с точностью и качеством изготовления двигателя.

Результатом моделирования производства является оценка изделия, характеризуемая  $v$ -вектором параметров качества его изготовления  $P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0n}]^T$ .

Часть параметров вектора  $P_0$  представляет собой входные данные имитационных моделей

испытаний и эксплуатации двигателя. При моделировании испытаний оптимизируемыми параметрами могут быть объем испытываемых двигателей  $N_{исп}$ , режимы  $R_{исп\zeta}(\tau_{исп}) = [r_{исп1}(\tau_{исп}), \dots, r_{испn}(\tau_{исп})]^T$  и длительность  $\tau_{исп\zeta}$  испытаний ( $\zeta = \overline{1, N_{исп}}$ ).

При этом дополнительно в качестве оптимизируемых могут рассматриваться: параметры системы отбора и подготовки двигателей к испытаниям:  $C_{оп} = [c_{оп.1}, \dots, c_{оп.n}]^T$ ; параметры системы контроля, приемки и отгрузки двигателей:  $C_{кпо} = [c_{кпо.1}, \dots, c_{кпо.\xi}]^T$  (в качестве параметров системы отгрузки могут рассматриваться: относительная величина количества двигателей, отгружаемых до начала испытаний, критические значения повреждаемости основных элементов изделия, при которых двигатель бракуется и др.); параметры качества применяемого испытательного оборудования  $C_0 = [c_{01}, \dots, c_{0m}]^T$  (например, в качестве моделируемых могут рассматриваться погрешности контроля параметров и др.).

Повреждаемость «критичных» элементов двигателя в испытаниях оценивается по моделям расходования ресурса:

$$P_{испij} = f [P_0, R_{исп\zeta}(\tau_{исп}), \tau_{исп\zeta}]; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m};$$

$$C_{оп}; C_{кпо}; C_0 = idem.$$

Моделирование испытаний позволяет определить повреждаемость «критичных» элементов двигателя, конечное состояние двигателя в целом, затраты на проведение испытаний и принимаемое решение о надежности двигателя и др. (например, при проведении периодических испытаний принимается решение об отгрузке или браковке партии двигателей, в зачет которых проводились периодические испытания).

В целом модель эксплуатации представляет собой синтез моделей более низкого уровня, включающий: модель эксплуатации двигателя; модель функционирования двигателя на объек-

Контактная информация: 8(347)273-79-54

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

те; модель влияния окружающей среды; модель расходования ресурса двигателя и др.

Моделирование повреждаемости «критичных» элементов двигателя в эксплуатации оценивается по модели вида:

$$P_{ij\bar{\tau}} = f[P_0, R_3(\tau_3), \tau_3]; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Позволяет оценить:

- параметры, характеризующие технико-экономический эффект от эксплуатации: затраты и доход от эксплуатации, вероятность выполнения двигателем своих функций и др.;
- значение эксплуатационной повреждаемости «критичных» элементов двигателя и др.

При моделировании ремонта изделия входными параметрами являются: отказавший элемент; характер отказа; затраты на ремонт, дифференцируемые в зависимости от вида отказа, и длительность ремонта.

При этом моделируются как плановый, так и внеплановый ремонты, связанные с устранением последствий отказов изделий в эксплуатации, обусловленных низким качеством их изготовления, низким качеством системы испытаний и др. Такие параметры, как стоимость грузоперевозок, цена топлива, заработная плата рабочих на производстве и другие включаются в имитационную модель как постоянные величины.

Поскольку основной целью испытаний является получение информации о состоянии испытываемого изделия, то основным требованием, предъявляемым к системе испытаний, можно считать получение максимума информации в процессе испытаний и минимально возможную погрешность полученных результатов при затрате ограниченных материальных и временных ресурсов.

При этом проведение ресурсных испытаний должно выявлять:

- недостатки конструкции и технологии изготовления изделия, которые не позволяют ему выполнять свои функции в условиях эксплуатации;
- отклонения от конструкции или технологии, допущенные производством;
- скрытые случайные дефекты материалов, элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению при существующих методах технического контроля;
- резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия.

Испытания эффективны тем в случае, если обеспечивается их эквивалентность эксплуатационным условиям, т. е. эксплуатационные условия и условия проведения испытаний принадлежат одной области режимов нагружения, именуемой областью автомодельности (т. е. неизменности физической природы расходования ресурса в испытаниях и эксплуатации), и за время эксплуатации, и за время испытаний вырабатывается одинаковая мера ресурса основными элементами узлов изделия.

Для оптимизации испытаний необходимо определить критерии эффективности, которые в общем случае разделяют на собственные и несобственные.

Собственная эффективность ресурсных испытаний количественно может характеризоваться несколькими показателями, основными из которых являются:

- уровень эквивалентности ресурсных испытаний эксплуатационным условиям по повреждаемости основных («критичных») элементов узлов изделия, оцениваемый «невязками» между повреждаемостью элементов в эксплуатации и в испытаниях;
- длительность испытаний  $\tau_{исп}$ ;
- объем испытываемых изделий  $N_{исп}$ .
- Показатели  $\tau_{исп}$  и  $N_{исп}$  в совокупности определяют временные и материальные затраты на проведение испытаний.

Дополнительно к перечисленным, в зависимости от особенностей применения изделия в эксплуатации, могут рассматриваться и другие показатели, например, для изделий многовариантного применения оптимизация испытаний проводится по критерию гарантированной проверки надежности и дифференцированного «зачета» в испытаниях эксплуатационных вариантов применения.

В случае, когда задан типовой эксплуатационный цикл нагружения изделия ( $N_{экс} = 1$ ), оптимизация испытаний проводится по критерию эквивалентности вида:

$$\begin{aligned} K_{п.ij} : \delta P_{ij} [N_{исп}^*, R_{исп}^*(\tau_{исп}), \tau_{исп}^*] &= \\ &= \min \delta P_{ij} [N_{исп}, R_{исп}(\tau_{исп}), \tau_{исп}] \vee \\ &\vee \left\{ \begin{array}{l} P_{испij} [N_{исп}^*, R_{исп}^*(\tau_{исп}), \tau_{исп}^*] - \\ - P_{эксij} [R_{экс}(\tau_{экс}), \tau_{экс}] \end{array} \right\} = \quad (2) \\ &= \min \left\{ \begin{array}{l} P_{испij} [N_{исп}, R_{исп}(\tau_{исп}), \tau_{исп}] - \\ - P_{эксij} [R_{экс}(\tau_{экс}), \tau_{экс}] \end{array} \right\}, \end{aligned}$$

где  $\Pi_{ij}$  – повреждаемость  $i$ -го элемента ( $i = \overline{1, n}$ ) по  $j$ -ой ( $j = \overline{1, m}$ ) характеристике расходования ресурса (длительной прочности, усталости, износу и т.д.);  $N_{исп}^*, R_{исп}^*, \tau_{исп}^*$  – значения  $N_{исп}$ ,  $R_{исп}$  и  $\tau_{исп}$ , при которых обеспечивается минимум показателя  $\delta\Pi_{ij}$ .

Когда существует не один, а несколько типовых эксплуатационных циклов нагружения изделия ( $N_{экс} > 1$ ), т. е. рассматриваются изделия многовариантного применения, то оптимизация испытаний проводится по критерию вида [1]:

$$\begin{aligned} & K_{\Pi, ij\zeta} : \delta\Pi_{ij} [N_{исп}^*, R_{исп}^* (\tau_{исп}), \tau_{исп}^*] = \\ & = \min \delta\Pi_{ij\zeta} [N_{исп}, R_{исп\zeta} (\tau_{исп\zeta}), \tau_{исп\zeta}] = \\ & = \min \left\{ \begin{array}{l} \Pi_{исп\zeta ij} [N_{исп}, R_{исп\zeta} (\tau_{исп}), \tau_{исп\zeta}] - \\ - \tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}] \end{array} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}]$  – выбранное по определенному правилу значение эксплуатационной повреждаемости элемента изделия, например, из условия воспроизведения в испытаниях максимальной эксплуатационной повреждаемости.

Для обеспечения эквивалентности испытаний может потребоваться проведение испытаний не одного, а нескольких изделий, т. е. в общем случае  $N_{исп} \geq 1$ . При  $N_{исп} > 1 \wedge N_{экс} > 1$  оптимизация испытаний проводится по критерию эквивалентности вида:

$$\begin{aligned} & K_{\Pi} : \Delta\Pi = \frac{1}{N_{и}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \sum_{\zeta=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (\Pi_0)^2 = \\ & = \min \left\{ \frac{1}{N_{исп}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \sum_{\zeta=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (\Pi_0^*)^2 \right\} = \\ & = \min \left\{ \frac{1}{N_{исп}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \sum_{\zeta=1}^{N_{и}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta\tilde{\Pi}_{\zeta ij}^2 [R_{исп\zeta} (\tau_{исп}), \tau_{исп\zeta}] \right\}; \\ & \Pi_0^* = \frac{\Pi_{исп\zeta ij} [R_{исп\zeta} (\tau_{исп}), \tau_{исп\zeta}] - \tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}]}{\tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}]}; \\ & \Pi_0 = \frac{\Pi_{исп\zeta ij} [R_{исп\zeta} (\tau_{исп}), \tau_{исп\zeta}] - \tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}]}{\tilde{\Pi}_{экс\zeta ij} [R_{экс} (\tau_{экс}), \tau_{экс}]}; \\ & \delta\tilde{\Pi}_{\zeta ij} \leq \delta\tilde{\Pi}_{\zeta ij}^{пл}; \quad R_{исп} (\tau_{исп}) \in G_{Rисп}; \\ & R_{экс} (\tau_{экс}) \in G_{Rэкс}; \quad \tau_{исп} \in G_{\tauисп}; \quad \tau_{экс} \in G_{\tauэкс}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\delta\tilde{\Pi}_{ij\zeta}$  – нормированное относительно  $\Pi_{экс\zeta ij}$  значение  $\delta\Pi_{ij}$ ;  $\delta\tilde{\Pi}_{ij\zeta}^{пл}$  – предельно допустимое значение  $\delta\tilde{\Pi}_{ij\zeta}$ , задаваемое изготовителем по согласованию с представителем заказчика;  $G_{Rисп}$ ,  $G_{Rэкс}$ ,  $G_{\tauисп}$ ,  $G_{\tauэкс}$  – области определения соответственно режимов и длительности испытаний и эксплуатации  $R_{исп}$ ,  $R_{экс}$ ,  $\tau_{исп}$  и  $\tau_{экс}$ , внутри которых обеспечивается автоточность испытательного и эксплуатационного циклов нагружения, т.е. сохраняется неизменной физическая картина процессов расходования ресурса.

Из (4) следует, что:

$$K_{\Pi} = 0 \text{ при } \Pi_{исп\zeta ij} = \Pi_{экс\zeta ij}, \quad K_{\Pi} = 1 \text{ при } \Pi_{исп\zeta ij} = 0.$$

Оптимизация испытаний с учетом показателей длительности и объема испытываемых изделий проводится по критериям  $K_{\tau}$  и  $K_N$ :

$$K_{\tau} : \tau_{исп\zeta}^* = \min \sum_{\zeta=1}^{N_{исп}} \tau_{исп\zeta}; \quad \tau_{исп} \in G_{\tauисп}; \quad (5)$$

$$K_N : N_{исп}^* = \min N_{исп}; \quad N_{исп} \in (1 \dots N_{экс}).$$

С учетом связи между качеством (уровнем обоснованности) ресурсных испытаний и технико-экономическим эффектом, получаемым от эксплуатации изделия, введем в рассмотрение внешний (несобственный) показатель эффективности, характеризующий эффект от эксплуатации изделия. Очевидно, что в данном случае речь идет о той доле эффекта, которая обусловлена влиянием уровня обоснованности испытаний: при испытаниях, не обеспечивающих воспроизведение эксплуатационной повреждаемости, в эксплуатацию могут ошибочно попадать некондиционные изделия, что ведет к убыткам за счет возникновения отказов, дефектов и неисправностей, а при испытаниях, чрезмерно ужесточенных по отношению к эксплуатационным условиям нагружения, в эксплуатацию, наоборот, не будут попадать кондиционные изделия, что также ведет к необоснованным убыткам.

Количественно внешний показатель эффективности может оцениваться одним из экономических показателей  $\mathcal{E}$  (рентабельностью, прибылью и т. д.) или показателем, характеризующим технический эффект от эксплуатации изделия, например, вероятностью выполнения боевым самолетом задания  $P_{в.з}$  и т. д.:

$$K_{экс} : \begin{cases} \mathcal{E} [N_{исп}^*, R_{исп}^* (\tau_{исп}), \tau_{исп}^*] = \\ = \max \mathcal{E} [N_{исп}, R_{исп} (\tau_{исп}), \tau_{исп}]; \\ P_{в.з} [N_{исп}^*, R_{исп}^* (\tau_{исп}), \tau_{исп}^*] = \\ = \max P_{в.з} [N_{исп}, R_{исп} (\tau_{исп}), \tau_{исп}]. \end{cases} \quad (6)$$

Наличие внутренних (собственных) показателей эффективности ресурсных испытаний  $\Delta\Pi$ ,  $\tau_{\text{ИСП.}\Sigma}$  и  $N_{\text{ИСП}}$ , а также внешнего (несобственно-го) показателя  $\Theta$  фактически сводит задачу обоснования ресурсных испытаний к задаче векторной оптимизации по критериям:

$$K_{\Sigma} = (K_{\Pi}, K_{\tau}, K_N, K_{\Theta}) \rightarrow \min;$$

или  $\Delta\Pi \rightarrow \min; \tau_{\text{И.}\Sigma} \rightarrow \min; N_{\text{ИСП}} \rightarrow \min; \Theta \rightarrow \min.$

Совместная оптимизация испытаний по критериям  $K_{\Pi}$ ,  $K_{\tau}$ ,  $K_N$  и  $K_{\Theta}$  возможна в случае, когда показатели эффективности имеют одинаковые (или близкие к одинаковым) интервалы определения. Это обеспечивается нормированием показателей  $\Delta\Pi$ ,  $\tau_{\text{ИСП.}\Sigma}$ ,  $N_{\text{ИСП}}$  и  $\Theta$  относительно параметров  $\tilde{\Pi}_{\text{ЭКС}ij}$  [ $R_{\text{ЭКС}}(\tau_{\text{ЭКС}})$ ,  $\tau_{\text{ЭКС}}$ ],  $\max \tau_{\text{ЭКС}}$ ,  $N_{\text{ЭКС}}$  и  $(\Theta_{\max} - \Theta_{\min})$  соответственно:

$$\Delta\Pi^{(H)} = \frac{\Delta\Pi}{\tilde{\Pi}_{\text{Э}ij}} = \frac{1}{N_{\text{И}}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \sum_{\zeta=1}^{N_{\text{ИСП}}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \Pi_o \in 0...1;$$

$$\Pi_o = \frac{\Pi_{\text{ИСП}i\zeta} [R_{\text{ИСП}}(\tau_{\text{ИСП}}), \tau_{\text{ИСП}i\zeta}] - \tilde{\Pi}_{\text{ЭКС}ij} [R_{\text{ЭКС}}(\tau_{\text{ЭКС}}), \tau_{\text{ЭКС}}]}{\tilde{\Pi}_{\text{ЭКС}ij} [R_{\text{ЭКС}}(\tau_{\text{ЭКС}}), \tau_{\text{ЭКС}}]};$$

$$\tau_{\text{И.}\Sigma}^{(H)} = \frac{\tau_{\text{И.}\Sigma}}{\max_{N_{\Theta}} \tau_{\Theta}} = \frac{1}{N_{\text{И}}} \left( \sum_{\zeta=1}^{N_{\text{И}}} \tau_{\text{И}\zeta} / \max_{N_{\Theta}} \tau_{\Theta} \right) \in 0...1;$$

$$N_{\text{И}}^{(H)} = \frac{N_{\text{И}}}{N_{\Theta}} \in 0...1; \quad \Theta^{(H)} = \frac{\Theta_{\max} - \Theta}{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}} \in 0...1,$$

где  $\Theta_{\min}$ ,  $\Theta_{\max}$  – минимальное и максимальное значения внешнего показателя  $\Theta$ , определенные по статистическим данным эксплуатации изделий-аналогов (значения показателей могут быть как положительными, так и отрицательными; во втором случае это означает, что эксплуатация изделия является убыточной).

Нормирование внешнего показателя  $\Theta$  по формуле (7) позволяет проводить оптимизацию испытаний минимизацией показателя  $\Theta^{(H)}$ , аналогично показателям  $\Delta\Pi^{(H)}$ ,  $\tau_{\text{И.}\Sigma}^{(H)}$  и  $N_{\text{И}}^{(H)}$ :

$$K_{\Pi}^{(H)}: \Delta\Pi^{(H)} = \min \frac{1}{N_{\text{И}}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \sum_{\zeta=1}^{N_{\text{И}}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \delta \tilde{\Pi}_{\zeta ij}^2 \in 0...1;$$

$$K_{\tau}^{(H)}: \tau_{\text{И.}\Sigma}^{(H)} = \min \frac{1}{N_{\text{И}}} \left( \sum_{\zeta=1}^{N_{\text{И}}} \tau_{\text{И}\zeta} / \max_{N_{\Theta}} \tau_{\Theta} \right) \in 0...1;$$

$$K_N^{(H)}: N_{\text{И}}^{(H)} = \min (N_{\text{И}} / N_{\Theta}) \in 0...1;$$

$$K_{\Theta}^{(H)}: \Theta^{(H)} = \min \frac{\Theta_{\max} - \Theta}{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}} \in 0...1.$$

Взаимовлияние показателей  $\Delta\Pi^{(H)}$ ,  $\tau_{\text{ИСП.}\Sigma}^{(H)}$ ,  $N_{\text{ИСП}}^{(H)}$  и  $\Theta^{(H)}$  неоднозначно и противоречиво

С учетом показателей эффективности ресурсных испытаний  $\Delta\Pi^{(H)}$ ,  $\tau_{\text{И.}\Sigma}^{(H)}$ ,  $N_{\text{И}}^{(H)}$  и  $\Theta^{(H)}$  формирование области компромиссных решений проводится многократной оптимизацией по функционалу вида:

$$K_{\Sigma} = (K_{\Pi}^{(H)}, K_{\tau}^{(H)}, K_N^{(H)}, K_{\Theta}^{(H)})^T: \Phi_{\Sigma} = \min [\alpha_1 \cdot \Delta\Pi^{(H)} + \alpha_2 \cdot \tau_{\text{ИСП.}\Sigma}^{(H)} + \alpha_3 \cdot N_{\text{ИСП}}^{(H)} + \alpha_4 \cdot \Theta^{(H)}],$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го показателя эффективности ( $\sum \alpha_i = 1$ ).

Выбор окончательного решения из множества Парето-оптимальных проводится разработчиком программы испытаний путем введения в рассмотрение дополнительных требований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гишваров А. С.** Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем. Уфа: Гилем, 2000. 338 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Давыдов Марсель Николаевич**, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепловым и электроракетным двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. ускоренных испытаний техн. систем.

**Агеев Георгий Константинович**, асс. той же каф. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. ускоренных испытаний техн. систем.

**Сахибгареева Гульсина Ильдаровна**, студентка той же каф. Иссл. в обл. ускоренных испытаний техн. систем.