

ПРОГРАММА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННОГО ГТД МНОГОВАРИАНТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Минигалеев С.М., Гишваров А.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Авиационные ГТД эксплуатируются в различных вариантах применения и условиях окружающей среды, что неизбежно отражается на повреждаемости их основных элементов узлов и усложняет выбор условий проведения стендовых ресурсных испытаний, включая ускоренные.

В работе рассматривается метод выбора параметров испытаний двигателя многовариантного применения, основанный на 4 критериях эффективности - Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и Φ_4 . Выбор оптимальных значений параметров нагружения двигателя в стендовых ресурсных испытаниях проводится относительно максимальных эксплуатационных повреждаемостей элементов узлов ГТД.

Критерий Φ_1 характеризует уровень достоверности оценки надежности двигателя в испытаниях. В детерминированной постановке оценка критерия проводится по формуле:

$$\Phi_1 = \frac{1}{N_y} \sum_{k=1}^{N_y} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\bar{\Pi}_{yjk} - \left(\max_l \bar{\Pi}_{yjl} \right)_k}{\left(\max_l \bar{\Pi}_{yjl} \right)_k} \right]^2 b_{ij}^2 \cdot \rho_{ij}^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$
$$\left(\max_l \bar{\Pi}_{yjl} \right)_k \leq \bar{\Pi}_{yjk} \leq \varepsilon_{jk}^{-1} a_{jk}.$$

где n - количество элементов двигателя; m - количество параметров ресурса (длительная прочность, износ и другие); N_y количество испытываемых двигателей; $\max_l \bar{\Pi}_{yjl}$ - максимальное значение повреждаемости элемента двигателя в эксплуатации; $\bar{\Pi}_{yjk}$ - повреждаемость элемента двигателя в стендовых ускоренных испытаниях; N_s - количество вариантов применения двигателя в эксплуатации; b - показатели точности моделей расходования ресурса; ρ - показатели значимости элементов двигателя; ε - запас по долговечности; a - долговечность.

В соответствии с (1) испытания обеспечивают гарантированную проверку надежности изделия, в первую очередь, по наиболее значимым элементам изделия, процессы расходования ресурса которых описываются наиболее точными моделями.

В стохастической постановке оценка критерия проводится по формуле:

$$\tilde{\Phi}_1 = \frac{1}{N_y} \sum_{k=1}^{N_y} \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\min \tilde{\Pi}_{yijk}^{(\gamma)} - \left(\max_{P,R} \max_l \tilde{\Pi}_{\alpha yjl}^{(\gamma)} \right)_k}{\left(\max_{P,R} \max_l \tilde{\Pi}_{\alpha yjl}^{(\gamma)} \right)_k} \right]^2 b_{ij}^2 \rho_{ij}^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\left(\max_{P,R} \max_l \tilde{\Pi}_{\alpha yjl}^{(\gamma)} \right)_k \leq \min_{P,R} \tilde{\Pi}_{ijk}^{(\gamma)} \leq \max_{P,R} \tilde{\Pi}_{yijk}^{(\mu)} < a_{ijk}.$$

Областью определения Φ_1 является интервал $0 \dots \Phi_{1 \text{ MAX}}$.

Критерий Φ_2 характеризует уровень дифференцированного зачета эксплуатационных вариантов применения двигателя в стендовых ускоренных испытаниях. Очевидно, что в интервале $1 \dots N_3$ всегда существуют изделия, эксплуатируемые по менее нагруженным вариантам применения (например, авиационный ГТД, может использоваться в менее нагруженном наземном варианте), в которых накапливается меньшая повреждаемость. В этом плане может оказаться целесообразным проведение дифференцированного "зачета" в испытаниях эксплуатационных вариантов применения изделия, начиная от наименее нагруженного и кончая наиболее нагруженным вариантом. В отличие от традиционно применяемого метода "зачета" партии выпускаемых изделий, такой подход позволяет, даже в случае отказа изделия в испытаниях, не браковать всю партию изделий, а признавать изделия годными к эксплуатации по тем вариантам применения, эксплуатационная повреждаемость которых будет выработана до момента отказа изделия в испытаниях.

В этом случае длительность испытаний, соответствующая "зачету" в испытаниях v -го эксплуатационного варианта, определится из условия:

$$P_{yijv} = F(P_o, R_y, \tau_{zijv}) = \overline{P_{\alpha yjl}}, \quad \tau_{zijv} = f(P_o, \overline{P_{\alpha yjl}}, R_y), \quad (3)$$

$$P_o = \text{idem}; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad l = \overline{1, N_3}.$$

С учетом n элементов и m характеристик ресурса v -ый эксплуатационный вариант применения изделия "зачтется" полностью за время

$$\tau_3 = \max_v \tau_{zijv}. \quad (4)$$

При этом для ряда элементов изделия повреждаемость будет превышать их эксплуатационную, соответствующую v -ому варианту применения, что может привести к искажению результатов проверки надежности как самих элементов, так и элементов, на надежность которых они оказывают влияние (например, отказ маслососа может привести к разрушению подшипников ротора по причине их масляного голодания и т.д.). Поэтому выбор параметров испытаний необходимо проводить ми-

нимизируя "невязки" между повреждаемостью, накопленной элементами за время τ_{yijv} , и повреждаемостью, накопленной в v -ом эксплуатационном варианте применения:

$$|\overline{\Pi}_{yijv} - \overline{\Pi}_{\alpha ijv}| \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad v = \overline{1, N_s}.$$

Для изделия в целом критерий дифференцированного "зачета" эксплуатационных вариантов применения в испытаниях примет вид:

$$\Phi_2 = \sum_{v=1}^{N_s} \Delta\tau_{3v} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\Delta\tau_{3v}$ интервал "зачета" v -го эксплуатационного варианта применения изделия в испытаниях, определяемый по формуле:

$$\Delta\tau_{3ijv} = (\max_{ij} \tau_{3ijv} - \min_{ij} \tau_{3ijv}). \quad (6)$$

Из (5) следует, что экстремальное значение критерия Φ_2 соответствует случаю, когда все элементы изделия "засчитываются" в испытаниях в один момент времени: $\Delta\tau_{31} = 0, \Delta\tau_{32} = 0, \dots, \Delta\tau_{3N} = 0$, при этом $\Phi_2 = 0$.

Реализация принципа дифференцированного "зачета" эксплуатационных вариантов применения изделия в испытаниях позволяет повысить эффективность испытаний за счет уменьшения числа необоснованно бракуемых вариантов применения изделия.

Нормированная оценка критерия проводится по формуле:

$$\Phi_2 = \frac{1}{N_y} \sum_{k=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{m_j} \left[\frac{\overline{\Pi}_{yijv} - \overline{\Pi}_{\alpha ijv}}{\overline{\Pi}_{\alpha ijv}} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

Критерий Φ_3 характеризует объем (количество) двигателей, устанавливаемых на стендовые ускоренные испытания:

$$\Phi_3 = N_y / N_s \rightarrow \min. \min \quad (8)$$

Областью определения Φ_3 является интервал $N^{-1} \dots 1$.

Критерий Φ_4 характеризует длительность стендовых ускоренных испытаний:

$$\Phi_4 = \left(\sum_{k=1}^{N_y} \tau_{yk} / \sum_{v=1}^{N_s} \tau_{3v} \right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где τ_y - длительность ускоренных испытаний; τ_3 - длительность эксплуатационных испытаний. Областью определения Φ_4 является интервал $0 \dots 1$.

Критерии Φ_1, Φ_2, Φ_3 и Φ_4 являются противоречивыми друг другу, поэтому окончательное решение по выбору параметров ускоренных испытаний является компромиссным. Решение компромиссных задач в тео-

рии исследования операций проводится методом Парето. Оптимальное решение получается путем оптимизации обобщенного критерия эффективности, полученного после свертки частных критериев:

$$\Phi_{\Sigma} = F(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4) \rightarrow opt. \quad (10)$$

Совместная реализация критериев Φ_1, Φ_2, Φ_3 и Φ_4 проводится через обобщенный показатель Φ_{Σ} путем преобразования и нормирования критериев. Это позволяет проводить сравнение и выбор оптимальных значений параметров ускоренных испытаний.

Выбор оптимальных по Парето значений параметров ускоренных испытаний $N_y^*, R_{yk}^*, \tau_{yk}^*, N_k^*$ проводится по обобщенной целевой функции

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi[N_y^*, R_{yk}^*, \tau_{yk}^*, N_k^*] = [A\Phi_1 + B\Phi_2 + C\Phi_3 + D\Phi_4] \rightarrow \min; \\ \left(\max_i \bar{\Pi}_{yijl} \right)_k \leq \bar{\Pi}_{yijk} \leq \varepsilon_{ijk}^{-1} a_{ijk}, \quad i = \bar{1}, n; \quad j = \bar{1}, m; \quad k = \bar{1}, N_y; \\ \tau_{y,l} = \max_i \tau_{yijl}; \quad l = \bar{1}, N_y; \quad N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_{N_y} = N_y; \\ \Pi = F(P_o, R(\tau), \tau); \quad P_o \in G_p; \quad R \in G_R, \end{array} \right. \quad (11)$$

где A, B, C, D - положительные числа, используемые в методе Парето ($A + B + C + D = 1$); P_o - вектор, характеризующий качество изготовления двигателя; $R(\tau)$ - вектор параметров режима испытаний; G_p - область реализации параметров качества двигателя; G_R - область реализации параметров режима испытаний.

При $N_{\Sigma} = 1$ область реализации режимов соответствует области эквивалентных испытаний G_R . При $N_{\Sigma} > 1$ область реализации режимов формируется объединением соответствующих эксплуатационных областей $G_{R1}, G_{R2}, \dots, G_{Rv}$ ($v \in \bar{1} \dots N_{\Sigma}$):

$$\begin{aligned} R_{y\xi} &= [R_1, R_2, \dots, R_s] \in G_{R\xi}; \\ G_{R\xi} &= G_{R1} \cup G_{R2} \cup \dots \cup G_{Rvi}. \end{aligned} \quad (12)$$

Существование в испытаниях одновременно N_y областей реализации режима ($G_{R1}, G_{R2}, \dots, G_{RN_y}$) обусловлено тем, что виды повреждений одних и тех же элементов изделия в различных вариантах применения, в общем случае, могут отличаться и, следовательно, не могут воспроизводиться в одних испытаниях. Например, если из N_{Σ} вариантов применения изделия в N_1 прогнозируется один вид разрушения, а в остальных N_2 - другой вид, то испытания реализуются, по крайней мере, на двух изделиях: на одном - в зачет N_1 вариантов, на другом - N_2 вариантов применения ($N_1 + N_2 = N_{\Sigma}$) и т.д.

Окончательно выбор параметров ускоренных испытаний проводится разработчиком программы испытаний из области оптимальных по Парето компромиссных решений.

На основе предложенных критериев эффективности авторами была разработана методика выбора оптимальных значений параметров стендовых ускоренных испытаний. Методика апробировалась на примере авиационного газотурбинного двигателя многовариантного применения, устанавливаемого на объекте, который эксплуатируется по двум профилям полета в трех климатических условиях: *A*, *B* и *C* ($N_3=6$). Решалась задача по выбору режимов и объема стендовых ускоренных совмещенных испытаний данного двигателя.

Анализ данных эксплуатации в виде типовых полетных циклов и статистики отказов, данных стендовых испытаний, прочностных и термогазодинамических расчетов двигателя показал, что основными элементами узлов, определяющими надежность двигателя, являются элементы с минимальными запасами прочности и наибольшим числом отказов, проявление которых связано с режимом и длительностью нагружения:

- рабочая (ЛТ) и сопловая (ЛС) лопатки турбины;
- рабочая лопатка первой ступени компрессора (ЛК);
- направляющая лопатка (ЛН) последней ступени компрессора;
- корпус камеры сгорания (КС);
- опорный подшипник ротора (ПР);
- ведущая шестерня привода агрегатов.

Режим нагружения двигателя задавался:

- относительной частотой вращения ротора \bar{n} , %;
- температурой воздуха на входе в двигатель T_{ax}^* , К;
- давлением воздуха на входе в двигатель P_{ax}^* , кг/см².

Область реализации режима нагружения двигателя в эксплуатации задавалась ограничениями по этим параметрам, а также параметрическими ограничениями, связанными с возможностями испытательного стенда. Учитывались также ограничения, связанные с изменением параметров режима нагружения в переходных процессах.

Модели напряженно-деформированного состояния элементов двигателя представлялись в виде уравнений, связывающих напряжения (σ) и температуры (T) $\sigma_{ЛТ}$, $T_{ЛТ}$, $\sigma_{ЛС}$, $T_{ЛС}$, $\sigma_{ЛК}$, $T_{ЛК}$, $\sigma_{ЛН}$, $T_{ЛН}$, $\sigma_{КС}$, $T_{КС}$, Q , $M_{КР}$ с параметрами режима нагружения \bar{n} , T_{ax}^* , P_{ax}^* . Определение констант моделей напряженно-деформированного состояния элементов проводилось по данным термогазодинамических и прочностных расчетов двигателя.

При нормальном распределении параметров режима нагружения, повреждаемости элементов были распределены по нормальному и экспоненциальному законам (4 и 2 элемента, соответственно), а также по закону Вейбулла (2 элемента).

Целевая функция для данного двигателя имела вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi [N_y^*, R_{y_k}^*, \tau_{y_k}^*, N_k] = (A\Phi_1 + C\Phi_4) \rightarrow \min, \\ \Phi_1 = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\min_{P,R} \tilde{\Pi}_{yij}^{(\gamma)} - \max_{P,R} \max_6 \tilde{\Pi}_{\alpha ij l}^{(\gamma)}}{\max_{P,R} \max_6 \tilde{\Pi}_{\alpha ij l}^{(\gamma)}} \right)^2 b_{ij}^2 \cdot \rho_{ij}^2; \\ \Phi_2 \in (0 \dots \Phi_{2 \max}); \quad \Phi_3 = idem; \quad \Phi_4 = \tau_y / \sum_{l=1}^N \tau_{\tau_l}; \\ (\max_{P,R} \max_6 \tilde{\Pi}_{\alpha ij l}^{(\gamma)}) \leq \min_{P,R} \tilde{\Pi}_{yij}^{(\gamma)} \leq \max \tilde{\Pi}_{yij}^{(\mu)} \leq \varepsilon_{ij}^{-1} a_{ij}, \\ i = \overline{1, 8}; \quad j = \overline{1, 3}; \quad l = \overline{1, 6}; \\ \Pi = F(P_o, R(\tau), \tau); \quad R \in G_R; \quad P_o = idem; \\ A = C = 0,5; \quad B = D = 0; \\ \xi_{ijk} = a_{ijk} = 1; \quad b_{ij} = \rho_{ij} = idem; \quad \mu = \gamma \approx 1; \quad a_{ij} = 1. \end{array} \right. \quad (13)$$

Выбор оптимальных значений параметров ускоренных испытаний проводился по специально разработанной для этой цели программе. Результаты выбора показали, что испытания длительностью $1,86\tau_C$ (где τ_C - длительность серийных ускоренных испытаний) на одном двигателе обеспечивают гарантированную проверку надежности в испытаниях всех шести эксплуатационных вариантов.

Сравнение повреждаемости элементов двигателя в серийных и опытных испытаниях показало, что серийные испытания обеспечивают проверку надежности только рабочей лопатки компрессора, что свидетельствует о крайне низкой эффективности испытаний, в то время как опытные испытания обеспечивают полную проверку лопаток соплового аппарата, рабочих и направляющих лопаток компрессора, корпуса камеры сгорания, ведущей шестерни привода и частичную (на 34,3%) проверку рабочей лопатки турбины и на 77,7% проверку радиально-упорного подшипника ротора.

Отличительная особенность работы СПЭГ работа в узком диапазоне рабочих частот движения поршня, так при изменении степени сжатия ε с 5 до 20 частоты f лежат в пределах от 6000 до 8000 циклов/мин. Возможность выхода сразу на повышенные частоты приводит к увеличению детонационной стойкости двигателя в целом, а также устраняет некоторые проблемы с уравновешенностью системы.

Свободнопоршневой генератор (СПГ) преобразует кинетическую энергию поршня, совершающего возвратно-поступательное перемещение, в электрическую энергию. Большинство известных конструкций свободнопоршневых генераторов электроэнергии, поршни которых связаны с магнитами, перемещающимися вдоль оси неподвижных соленоидов, выполнены с механическими системами газораспределения и воспламенения топлива.

Создание микропроцессорной системы управления СПЭГ значительно расширяет его возможности и область практического применения.

Определены четыре основных режима этой системы.

Режим основной. Ведущее звено - поршень, совершающий перемещения за счёт циклически изменяющегося давления в рабочей камере цилиндра; магнит возбуждает в обмотке катушки переменное напряжение (режим электрогенератора).

Режим запуска. Ведущее звено - магнит, совершающий перемещения за счёт подачи напряжения изменяющейся частоты на обмотку катушки; поршень создаёт в рабочей камере цилиндра давление рабочей смеси (режим электродвигателя).

Режим контроля. Если в режиме запуска достигнуто воспламенение смеси в рабочей камере (зажигание); осуществляется переход к режиму электрогенератора.

Если в основном режиме к моменту достижения максимального давления в рабочей камере нет зажигания, осуществляется переход к режиму электродвигателя на частоте основного режима.

Режим регулирования. При изменении нагрузки на электрогенератор по определённой программе осуществляется подача топлива и момент искрообразования, по сигналам датчиков положения поршней или давления в рабочей камере, корректируя работу СПЭГ.

Режимы контроля и регулирования осуществляются автоматически как при запуске, так и при работе электрогенератора.

Помимо всего вышеперечисленного система управления СПЭГ должна включать в себя систему зарядки аккумулятора, которая включает в себя систему выпрямления переменного (несинусоидального) тока, вырабатываемого СПЭГ, систему поддержания постоянства напряжения, поступающего на обмотки аккумулятора и к потребителю.

Система СПЭГ-аккумулятор (СА) предполагает систему как совместной, так и раздельной работы СПЭГ и аккумулятора по отдельности в качестве выработки электроэнергии потребителю. Система управления должна обеспечить оптимальную работу комбинации СА - при разрядке аккумулятора включается в работу СПЭГ, который в свою очередь подзаряжает аккумулятор и вырабатывает электроэнергию потребителю; при увеличении потребностей в электроэнергии осуществляется совместная их работа.