

УДК 621.31

МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. С. Гишваров¹, М. Н. Давыдов²

¹ kafedra.ad@mail.ru, ² mar55@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.12.2014

Аннотация. Актуальной задачей ускоренных ресурсных испытаний (УИ) энергетических установок (ЭУ) является разработка научно-обоснованного метода выбора объема, режимов и длительности УИ, обеспечивающих эквивалентность одновременно по всем основным элементам и характеристикам расходования ресурса ЭУ. Такие испытания рассматриваются как комплексные ресурсные УИ. Решение данной проблемы создает основу для наиболее полной проверки надежности и ресурса ЭУ методом ускоренных испытаний.

Ключевые слова: энергетическая установка; комплексные ускоренные испытания; критерии эффективности; повреждаемость; целевая функция.

Для энергетических установок (газотурбинные двигатели, газоперекачивающие агрегаты, приводы электрических генераторов и др.) характерно, что их надежность определяется одновременно совокупностью элементов и характеристик расходования ресурса. Ввиду различной интенсивности влияния режимов нагружения на повреждаемость элементов энергетических установок (ЭУ), наличия функциональных ограничений на параметры режима нагружения, ограничений по автономности длительных и ускоренных испытаний (неизменности физической природы расходования ресурса в ускоренных и длительных испытаниях) и других факторов, эффективность ускоренных испытаний (УИ) существенно снижается [1-3]. Поэтому актуальной задачей проблемы УИ является разработка научно обоснованного метода выбора объема, режимов и длительности УИ, обеспечивающих эквивалентность одновременно по всем основным элементам и характеристикам расходования ресурса ЭУ. Решение данной проблемы создает основу для наиболее полной проверки надежности и ресурса ЭУ методом ускоренных испытаний.

Существующие методы УИ, в силу различных причин (сложности реализации метода, несоответствия возможностей разработчика целям проводимого исследования, большой длительности испытаний, отсутствия исходных данных для реализации конкретного метода УИ и др.) на практике не всегда оказываются эф-

фективными. Например, исследование оптимальной области ускоренных испытаний (авиационной газотурбинной силовой установки ТА-6А) показало, что причиной уменьшения коэффициента ускорения испытаний являются:

- ограничения на параметры режима нагружения;
- наличие элементов ЭУ, скорость выработки ресурса которых слабо зависит от параметров режима нагружения;
- наличие параметров режима, качественно и количественно по-разному влияющих на скорость расходования ресурса элементов ЭУ;
- наличие функциональной связи между параметрами режима нагружения.

Очевидно, что чем шире перечень методов УИ, тем эффективнее можно решать задачи по повышению надежности и ресурса ЭУ.

Теоретической основой для обоснования ускоренных испытаний ЭУ являются основные положения теории моделирования, в первую очередь – теории подобия [4]: для двух сравниваемых процессов – ускоренных Y_y и длительных Y_n испытаний, процессы которых зависят от факторов x_1, x_2, \dots, x_n и описываются зависимостями

$$Y_y = \phi(x_{y1}, x_{y2}, \dots, x_{ym}) \quad \text{и} \quad Y_n = \phi(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn}),$$

подобие обеспечивается при тождественности уравнений, описывающих сравниваемые про-

цессы, и равенстве сходственных критериев подобия.

Согласно π -теореме критерии подобия разделяются на определяемые, в которых содержится исследуемый параметр, и определяющие, в которых содержатся параметры, характеризующие физические свойства исследуемого процесса (параметры рабочей среды и внешних нагрузок, свойства материалов, начальные и граничные условия процесса и т.д.). Следствием π -теоремы является то, что определяемые критерии подобия представляют собой однозначные функции определяющих. Применительно к процессам расходования ресурса ЭУ определяемыми параметрами являются обобщенные запасы прочности n_σ , долговечности n_τ , повреждаемости Π , а определяющими – производственно-технологические параметры, характеризующие качество ЭУ (исходное состояние ЭУ перед испытаниями) $P_0 = (P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0v})^T$, параметры режима нагружения ЭУ $R(\tau) = (R_1, R_2, \dots, R_s)^T$ и длительность испытаний τ [1]: $\Pi_y = \phi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y]$; $\Pi_n = \phi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n]$. (1)

Зависимости вида (1) в теории надежности трактуются как модели разрушения, деградации, утраты работоспособности, выработки ресурса и др. [1, 2].

Согласно (1), в области исходного состояния G_P и области режимов нагружения G_R при известной функции связи $\Pi = \phi [P_0, R(\tau), \tau]$, зависимости $\Pi_y = \phi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y]$ и $\Pi_n = \phi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n]$ полностью тождественны. Поэтому всегда можно выбрать параметры исходного состояния $P_{0n} \in G_P$, режима нагружения $R_n(\tau) \in G_R$ и длительность испытаний $\tau_y \leq \tau_n$, при которых будет обеспечиваться эквивалентность ускоренных и длительных испытаний:

$$\begin{aligned} \phi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y] &= \phi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n]; \\ P_{0y} &= C_P P_{0n} = (C_{P1} P_{0n1}, \dots, C_{Pu} P_{0nu})^T; \\ R_n(\tau) &= C_r R_n(\tau) = (C_{r1} R_{n1}, \dots, C_{rs} R_{ns})^T; \\ \tau_y &= C_y \tau_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_y – множитель подобного преобразования времени при переходе от длительных испытаний к ускоренным ($C_y = K_y^{-1}$; $K_y = \tau_n / \tau_y$ – коэффициент ускорения испытаний).

При этом, если режимов испытаний с длительностью $\tau_y < \tau_n$ несколько, то всегда можно выбрать режим с $\tau_y^* = \min_i \tau_{yi}$.

При наличии нескольких участков нагружения ЭУ повреждаемость Π определяется суммированием вида:

$$\Pi = \sum_{i=1}^z \frac{\tau_i}{\tau_i^*}, \quad (3)$$

где z – число участков нагружения ЭУ; τ_i – длительность режима нагружения; τ_i^* – время до разрушения или наступления параметрического отказа ($\tau_i^* = \phi [P_0, R(\tau)]$).

В формуле (3) параметр Π является величиной безразмерной (нормализованной по τ^*), т.е. соответствует критериальной форме, поэтому условие подобия ускоренных и длительных испытаний можно записать в виде

$$\pi = \Pi_n / \Pi_y = 1; \quad P_0 \in G_P; \quad R(\tau) \in G_R. \quad (4)$$

Различные сочетания параметров P_0 и R внутри областей G_P и G_R , обеспечивающие выполнение условия (4) при $\tau_y < \tau_n$, образуют область ускоренных испытаний.

С учетом естественного рассеяния $P_0 = (P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0v})^T$ и $R(\tau) = (R_1, R_2, \dots, R_s)^T$, а также влияния неучтенных факторов ε_K повреждаемость является величиной случайной:

$$\tilde{\Pi} = \phi [\tilde{P}_0, \tilde{R}(\tau), \tau, \varepsilon_K]; \quad \tilde{\pi} = \tilde{\Pi}_n / \tilde{\Pi}_y. \quad (5)$$

В математическом плане:

- параметры, входящие в критерии подобия как величины случайные, подчинены определенным законам распределения и представляют систему случайных величин;

- критерии подобия являются функциями случайных величин: $\tilde{\pi} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$.

Наличие моделей расходования ресурса позволяет с некоторой наперед заданной точностью решать задачу выбора режимов и длительности УИ:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi} = \tilde{\Pi}_n / \tilde{\Pi}_y &\in [\underline{\pi}, \bar{\pi}]; \quad \tilde{\Pi} = \phi [\tilde{P}_0, \tilde{R}(\tau), \tau]; \\ \tilde{P}_0 &\in G_P; \quad \tilde{R}(\tau) \in G_R, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\underline{\pi}, \bar{\pi}$ – нижняя и верхняя границы критерия подобия $\tilde{\pi}$.

Повреждаемость ЭУ можно представить в виде матрицы размера $n \times m$, строки которой соответствуют элементам ЭУ, а столбцы – характеристикам расходования их ресурса:

$$\tilde{\Pi}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{11} & \tilde{\Pi}_{12} & \dots & \tilde{\Pi}_{1m} \\ \tilde{\Pi}_{21} & \tilde{\Pi}_{22} & \dots & \tilde{\Pi}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{\Pi}_{n1} & \tilde{\Pi}_{n2} & \dots & \tilde{\Pi}_{nm} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}. \quad (7)$$

При вероятностной оценке процессов расходования ресурса ЭУ условие подобия ускоренных и длительных испытаний формулируется следующим образом: если для испытываемых ЭУ (включая элементы, узлы, системы, агрегаты и физические процессы, протекающие

в них) параметры, определяющие природу этих процессов, имеют тождественные плотности распределения, а значения критериев подобия (6) находятся в пределах нижней и верхней границ доверительного интервала, то такие испытания принадлежат одной генеральной совокупности:

$$\tilde{\pi}_{ij} = \frac{\tilde{\Pi}_H}{\tilde{\Pi}_V} \in [\underline{\pi}_{ij}, \overline{\pi}_{ij}]; \quad i=\overline{1, n}; \quad j=\overline{1, m}; \quad (8)$$

$$\tilde{\Pi}_{ij} = \phi_{ij}[\tilde{P}_0, \tilde{R}(\tau), \tau]; \quad \tilde{P}_0 \in G_P; \quad \tilde{R}(\tau) \in G_R.$$

С учетом множителя подобного преобразования $C_y = K_y^{-1}$ условие подобия принимает вид:

$$\begin{cases} \tilde{K}_{ij} = F_{ij}(\tilde{P}_0, \tilde{R}(\tau)) \in [\underline{K}_{yij}, \overline{K}_{yij}]; \\ i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \\ \tilde{R}_y(\tau) \in G_R; \quad \tilde{P}_0 \in G_P. \end{cases} \quad (9)$$

Если принадлежность параметров векторов P_0 и R соответственно областям G_P и G_R является необходимым условием, то условие $K_{yij} \in [\underline{K}_{yij}, \overline{K}_{yij}]$ является достаточным условием подобия ускоренных и длительных испытаний при вероятностной оценке.

Таким образом, наличие моделей расходования ресурса и доверительных интервалов для коэффициента $K_{yij} \in [\underline{K}_{yij}, \overline{K}_{yij}]$ позволяет расчетным методом определять объем, режимы и длительность УИ в областях определения G_P и G_R .

На практике моделирование УИ возможно двумя методами: статистическим и физико-статистическим.

Высокая надежность современных ЭУ, а следовательно, небольшое число их отказов при испытаниях затрудняют получение достоверной информации о надежности с использованием статистических методов. Поэтому статистические методы, основанные на определении или подтверждении заданной интенсивности отказов, из-за большой трудоемкости испытаний становятся нерациональными.

Более эффективным для моделирования УИ является физико-статистический метод, согласно которому реальная ЭУ непрерывно изменяется вследствие глобального принципа роста энтропии, как представляющая собой термодинамически неустойчивую систему [1, 2].

Знания о протекании физико-химических процессов, происходящих в ЭУ, позволяют принимать решения по совершенствованию их конструкции, технологии изготовления, а также обоснованно выбирать объем, режимы и длительность УИ.

Реализация физико-статистического метода моделирования УИ проводится на основе обобщенной математической модели расходования ресурса, полученной объединением моделей расходования ресурса отдельных элементов узлов ЭУ [1].

Как правило, на практике при моделировании всегда стремятся, с одной стороны, к наиболее полному учету всех факторов формализуемого процесса расходования ресурса, а с другой стороны – к простоте его описания.

В связи со сложностью физико-химических процессов, протекающих в ЭУ, число параметров, влияющих на выходные характеристики, довольно велико. Все это вызывает необходимость в каждом конкретном случае вводить определенные ограничения. Поэтому обобщенная математическая модель, формируемая в виде системы моделей расходования ресурса отдельных элементов ЭУ, должна отражать только те свойства и те процессы, которые с позиций надежности являются определяющими.

Ввиду приближенности моделей расходования ресурса (1), обобщенная модель описывает реальные процессы расходования ресурса ЭУ также приближенно. При этом очевидно, что выбор режима и длительности ускоренных испытаний должен проводиться в пределах области применимости обобщенной модели расходования ресурса. При этом необходимо также учитывать возможности испытательного оборудования, запасы по форсированию режима нагружения и ограничения на область автоточности УИ, где сохраняется неизменной физическая природа процессов расходования ресурса в длительных и ускоренных испытаниях, т.е. обеспечивается физическое подобие в интервале изменения численных значений критериев подобия.

Границы области автоточности задаются ограничениями 1 и 2 рода:

$$G_R^a : \begin{cases} R_{a.min} \leq R_y \leq R_{a.max}; \\ f_{a.min}(R_y) \leq f(R_y) \leq f_{a.max}(R_y), \end{cases} \quad (10)$$

где $R_{a.min}$, $f_{a.min}(R_y)$, $R_{a.max}$, $f_{a.max}(R_y)$ – соответственно нижние и верхние границы области автоточности 1 и 2 рода.

Ввиду наличия конструктивных ограничений и особенностей системы регулирования ЭУ, параметры режима нагружения могут быть функционально связаны между собой, что также необходимо учитывать при выборе значений режимов и длительности УИ:

$$G_R^b : \begin{cases} F(R_y) = 0; \\ f_{s.min}(R_y) \leq f(R_y) \leq f_{s.max}(R_y). \end{cases} \quad (11)$$

Ограничения (10) и (11) образуют в пространстве параметров R_1, R_2, \dots, R_s область $G_R \rightarrow G_R^a \cup G_R^b$, в которой проводится выбор оптимальных режимов и длительности УИ.

Обобщенная модель расходования ресурса позволяет, с одной стороны, при заданных режимах нагружения определять длительность испытаний, с другой стороны, для заданной длительности испытаний определять режимы нагружения ЭУ, т.е. она представляет собой математическую модель УИ, позволяющую выбирать оптимальные значения режимов и длительности.

Обобщенная модель расходования ресурса в общем случае формируется [1, 5]:

- априорно известными моделями;
- моделями, построенными методами многофакторного регрессионного анализа по статистическим данным эксплуатации (испытаний) ЭУ и (или) его аналогов в различных условиях (моделирование методом пассивных экспериментов);
- моделями, построенными методом планированного эксперимента (моделирование методом активных экспериментов).

Основные требования, предъявляемые к УИ, сводятся к обеспечению [1, 2]:

- автомодельности (неизменности физической природы расходования ресурса в ускоренных и длительных испытаниях);
- равенства вырабатываемых ресурсов в ускоренных и длительных испытаниях по n элементам и m характеристикам расходования ресурса ЭУ;
- минимума временных и материальных затрат на проведение УИ.

Количественно данные требования можно оценивать через частные критерии эффективности $K_a, K_э, K_\tau$ и $K_з$, с учетом которых в дальнейшем проводить выбор оптимальных значений объема, режимов и длительности УИ.

Автомодельность УИ обеспечивается выбором режимов из области реализации G_R^a , задаваемой ограничениями (10):

$$K_a \sim R_y \in G_R^a. \quad (12)$$

Согласно (2) показатель K_y характеризует длительность УИ:

$$K_y = \tau_n / \tau_y \rightarrow \max \vee \tau_y \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$\tau_y = f(P_0, R_y); \quad K_y = f(P_0, R_y).$$

Для испытаний, включающих z участков нагружения:

$$K_y = (K_{y1}, \dots, K_{yz})^T; \quad K_y = \sum_{j=1}^z \tau_{ij} / \sum_{j=1}^z \tau_{yj}.$$

Критерий эквивалентности $K_э$ характеризует величину «рассогласования» между коэффициентом ускорения K_y , принимаемым для ЭУ в целом, и коэффициентами ускорений K_{yij} её элементов:

$$K_{эij} = |K_y - K_{yij}| = |\delta K_{yij}| \rightarrow 0; \quad (14)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}.$$

Поскольку критерии $K_a, K_y, K_э$ и $K_з$ характеризуют основные требования, предъявляемые к УИ, то, следовательно, образуют полную группу критериев, с учетом которой следует проводить выбор оптимальных значений режимов R_y^*

и длительности τ^* УИ:

$$R_y^*(\tau_y^*) = f(K_a, K_э, K_y, K_з) \rightarrow opt. \quad (15)$$

Исследование оптимальной области ускоренных испытаний ЭУ показывает, что критерии $K_э$ и K_y являются противоречивыми друг к другу и вопрос совместной их реализации при выборе параметров УИ требует отдельного рассмотрения, а оптимизацию УИ по критерию $K_э$ следует проводить по целевой функции, рассматриваемой ниже [1, 2].

В общем случае, ввиду наличия ограничений на область реализации режима G_R , незначительного влияния режима на скорость расходования ресурса элементов ЭУ и ограниченности числа параметров режима нагружения s ($s \ll n, m$), значение коэффициента ускорения $K_{yij} = F(P_0, R_y)$, рассчитанное по обобщенной модели расходования ресурса для заданного режима и начального состояния ЭУ $P_0 = idem$, будет отличаться от его значения K_y , принимаемого для ЭУ в целом, на величину некоторой «невязки»:

$$\delta K_{yij} = (K_y - K_{yij}); \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}. \quad (16)$$

$$\delta K_{y11} \neq \dots \neq \delta K_{ynm} \neq 0.$$

Полная эквивалентность длительных и ускоренных испытаний обеспечивается при

$$\delta K_{y11} = \dots = \delta K_{ynm} = 0. \quad (17)$$

Поэтому для ЭУ в целом и дискретно заданного значения K_y выбор режимов и длительности УИ возможен минимизацией суммарной «невязки» по коэффициентам ускорения элементов K_{yij} , что позволяет в максимально возможной степени обеспечить эквивалентность УИ одновременно по n элементам и m характеристикам расходования ресурса ЭУ.

Введем некоторую функцию – переменную величину, значение которой зависит от параметров режима нагружения на z участках и K_y :

$$Q(K_y, R_{y\epsilon}) = \sum_{\epsilon=1}^z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (K_{y\epsilon} - K_{y\epsilon ij})^2 =$$

$$= \sum_{\epsilon=1}^z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta K_{y\epsilon ij}^2 \rightarrow \min; \quad (18)$$

$$K_y = \sum_{\epsilon=1}^z \tau_{n\epsilon} / \sum_{\epsilon=1}^z \tau_{y\epsilon}; \quad K_{y\epsilon} = F(P_0, R_{y\epsilon}).$$

Минимум квадратичной функции (18) означает, что соответствующие ей значения $R_{y\epsilon}^* = (R_{1\epsilon}^*, R_{2\epsilon}^*, \dots, R_{S\epsilon}^*)^T$ и $\tau_{y\epsilon}^*$ являются оптимальными, поскольку суммарная «невязка» между заданным и расчетными значениями коэффициентов ускорения элементов ЭУ достигает наименьшего значения, т.е. в области возможных значений параметров режима нагружения G_R в максимально возможной степени обеспечивается близость ускоренных испытаний к длительным.

Учитывая точность моделей в описании реальных процессов расходования ресурса, а также значимость элементов в обеспечении надежности ЭУ в целом, функция цели (18) примет вид:

$$Q(K_y, R_{y\epsilon}) = \sum_{\epsilon=1}^z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} \rho_{ij} \delta K_{y\epsilon ij}^2 \rightarrow \min, \quad (19)$$

где b_{ij} , ρ_{ij} – веса соответственно точности моделей расходования ресурса и значимости элементов ЭУ.

Согласно (19) УИ обеспечивают минимум «невязок» $\delta K_{y\epsilon ij}$, в первую очередь, для наиболее значимых элементов ЭУ, процессы расходования ресурса которых описываются наиболее точными моделями.

Если уровень эквивалентности длительных и ускоренных испытаний вместо «невязок» по коэффициентам ускорения $\delta K_{y\epsilon ij}$ оценивать через «невязки» по повреждаемости элементов ЭУ $\delta \Pi_{y\epsilon ij} = \delta \Pi_{n\epsilon ij} - \delta \Pi_{y\epsilon ij}$, то целевая функция (19) примет вид [1]:

$$Q(K_y, R_{y\epsilon}) = \sum_{\epsilon=1}^z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} \rho_{ij} \delta \Pi_{y\epsilon ij}^2 \rightarrow \min. \quad (20)$$

Количественно веса точности b определяются по формуле

$$b = T / \sqrt{D(n)}, \quad (21)$$

где T – некоторая константа, выбираемая из условия получения наиболее удобных значений b_{ij} , например, $\sum_i \sum_j b_{ij} = 1$; $D(n)$ – дисперсия параметра ресурса.

Определение весов значимости элементов ρ_{ij} проводится на основе анализа возможных последствий, к которым может привести отказ элементов ЭУ. Оценка проводится методом экспертных оценок, включая анализ статистиче-

ских данных по дефектам и отказам аналогичных ЭУ в эксплуатации.

Согласно критерию K_y длительность УИ должна быть по возможности минимальной. С учетом порогового значения K'_y , разделяющего область значений K_y на $K_y = 1 \dots K'_y$ (где проведение УИ, ввиду большой длительности, не имеет смысла) и на $K_y = K'_y \dots \infty$ (где проведение УИ экономически оправданно), выбор режима проводится в интервале:

$$DK_y \in K'_y \dots K_{y \max}, \quad (22)$$

где $K_{y \max}$ – некоторая положительная величина, соответствующая максимальному (реальному) значению коэффициента ускорения.

Фактически DK_y представляет собой величину «уступки» по критерию K_y . Варьированием параметров режима и длительностью испытаний в области G_R и интервале значений $K_y \in (K'_y \dots K_{y \max})$ оптимизируются режимы и длительность испытаний по функции цели (19) до выполнения условия $\delta K_{y\epsilon ij} \leq \delta K_{y\epsilon ij}^{sp}$ (где $\delta K_{y\epsilon ij}^{sp}$ – величина «уступки» по $\delta K_{y\epsilon ij}$). За окончательный выбирается вариант, для которого

$$K_y = \max_{ij} (K_{yij}) \in DK; \quad (23)$$

$$|\delta K_{yij}| = |K_y - K_{yij}| \leq \delta K_{yij}^{sp}.$$

При наличии нескольких локальных минимумов функции (19), удовлетворяющих условию (23) при одинаковых значениях коэффициента ускорения испытаний, за окончательный принимается вариант с наименьшими затратами на их проведение, т.е. УИ оптимизируются по критерию K_3 :

$$K_3 \sim C(R_y) = \min_i (C_1, C_2, \dots, C_v), \quad (24)$$

где C_i – затраты на проведение i -х УИ.

Структурная схема совместной реализации критериев эффективности K_a , K_y , K_3 и K_3 при выборе оптимальных значений параметров УИ приведена на рис. 1, а блок-схема программы – на рис. 2.

Исходными данными являются:

- обобщенная модель расходования ресурса ЭУ (7);
- ограничения на параметры режима (10) и (11);
- величина допустимого рассогласования по коэффициентам ускорения δK_{yij}^{sp} , $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$;
- веса точности моделей расходования ресурса b_{ij} и значимости элементов ЭУ ρ_{ij} ;

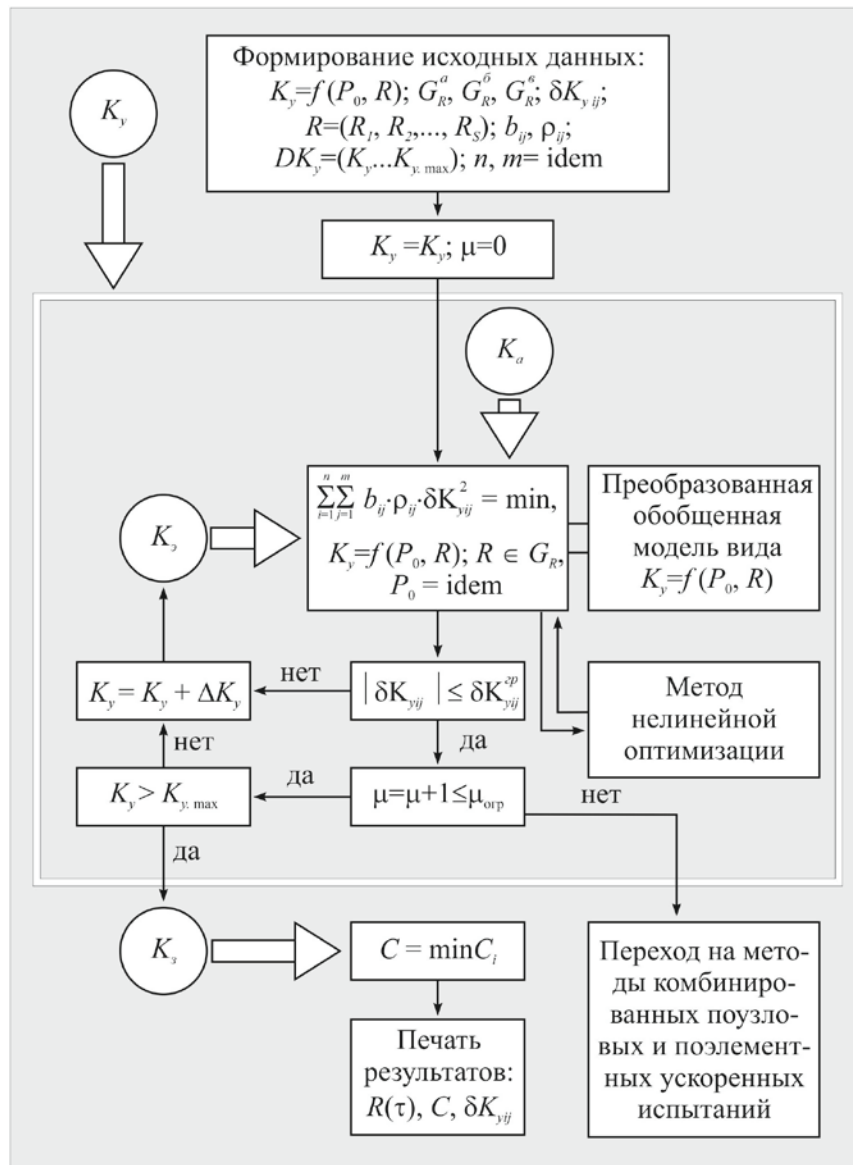


Рис. 1. Структурная схема реализации критериев K_y, K_a, K_z, K_z при выборе оптимальных значений режимов и длительности ускоренных испытаний

• интервал значений $K'_y \dots K_{y \max}$, в котором проводится выбор параметров УИ.

Последовательность выбора следующая:

1. Вводятся исходные данные.

2. Задаются значения K_y и ΔK_y (в первом приближении $\Delta K_y = 0,5 \dots 1$). Присваиваются начальные значения параметрам режима испытаний R_1, R_2, \dots, R_S .

3. Методом нелинейной оптимизации по целевой функции (19) определяются режимы и длительность ускоренных испытаний.

4. Если $\delta K_{yij} \leq \delta K_{yij}^{sp}$, то необходимо перейти к п. 5, в противном случае – к п. 8.

5. Параметрам режима испытаний присваиваются очередные значения. Количество рассматриваемых вариантов равно N .

Если $N < N_{огр}$ (где $N_{огр}$ – число вариантов, задаваемое разработчиком программы ускоренных испытаний), то необходимо перейти к п. 6.

Если $N \geq N_{огр}$, то необходимо перейти к п. 7.

6. Присваиваются новые начальные значения параметрам режима испытаний и вновь проводится оптимизация параметров УИ по п.3 до выполнения условия $N \leq N_{огр}$. При $N > N_{огр}$ необходимо перейти к п. 7.

7. Из N вариантов выбираются режимы ускоренных испытаний, при которых затраты на их проведение являются минимальными; то есть

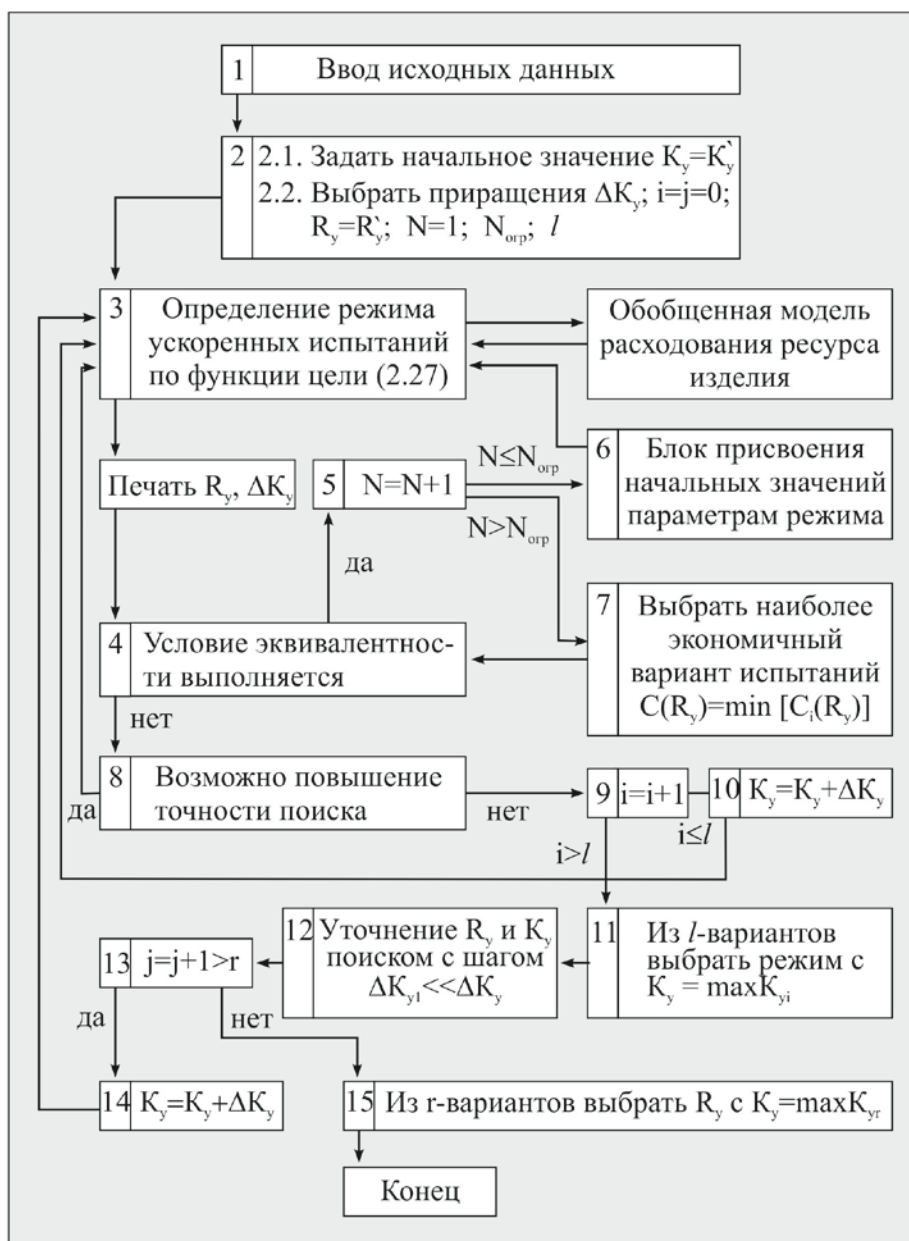


Рис. 2. Блок-схема программы выбора оптимальных значений режимов и длительности ускоренных испытаний

$C(R) = \min_i(C_i)$, и осуществляется переход к п. 9.

Если требование экономичности испытаний не учитывается, то выбирается вариант, для которого суммарная «невязка» по коэффициентам ускорения наименьшая.

8. Если $K_y \in K'_y \dots K_{y \max}$, то осуществляется переход к п. 9. При $i = l$ необходимо перейти к п. 10.

9. Показателю K_y присваивается новое значение и проводится выбор параметров ускоренных испытаний по п. 3.

10. Из l вариантов выбирается вариант с максимальным значением K_y .

11. Проводится уточнение режима R_y и коэффициента ускорения K_y путем поиска режимов и длительности испытаний в интервале $K_y = K'_y \dots K''_y$ с шагом ΔK_{y1} ($\Delta K_{y1} \ll \Delta K_y$). Число дискретных значений K_y в данном интервале составляет r (ориентировочно $r \approx 5 \dots 6$).

12. Если число вариантов j не превышает своего предельного значения r , то осуществляется переход к п. 13, в противном случае необходимо перейти к п. 14.

13. Задается приращение значению K_y и методом нелинейной оптимизацией по п. 3 определяются режимы и длительность УИ.

14. Из r вариантов выбирается тот, для которого значение K_y имеет максимальное значение.

В некоторых случаях в группу варьируемых могут включаться не все составляющие режима испытаний, например, в том случае, когда требуется сохранить какой-либо параметр режима без изменения, поиск ведется по изложенному выше алгоритму до тех пор, пока не нарушится условие (23). При $|\delta K_y| > K_{yij}^{zp}$ число варьируемых параметров увеличивается, и поиск режима и длительности испытаний ведется в новой «расширенной» области.

Если выбор режимов и длительности УИ, обеспечивающих эквивалентность ускоренных и длительных испытаний, невозможен, то можно воспользоваться следующим [1]:

- за окончательный выбрать вариант с $K_y = \max_{ij} K_{yij}$. При этом для элементов с $K_{yij} < K_y$ оценку надежности проводить методом прогнозирования или проведением автономных поэлементных или поузловых УИ на отдельных установках и стендах;

- расширить область поиска параметров УИ за счет увеличения верхней границы по $\delta K_{yij} = K'_y - K_{yij}$, т.е. для ряда элементов ЭУ допустить проведение оценки надежности «в запас» (что часто применяется на практике) и повторить поиск параметров ускоренных испытаний по функции цели (19);

- элементы ЭУ с $K_{yij} < K'_y$ ставить на испытания с предварительно выработанным ресурсом, например, в условиях эксплуатации;

- переходить к комбинированным УИ за счет сочетания одновременно нескольких методов сокращения длительности испытаний;

- периодически отключать от нагрузки «менее долговечные элементы» (коэффициенты ускорения которых превышают значение коэффициента ускорения, принимаемого для ЭУ в целом);

- проводить дополнительные испытания при условии, что общий объем материальных и временных затрат при этом остается меньшим по сравнению с длительными испытаниями;

- увеличить количество ЭУ, испытываемых по нескольким программам УИ.

Пример 1. ЭУ – авиационная газотурбинная силовая установка устанавливается на нескольких летательных аппаратах и состоит из турбокомпрессора, редуктора, генераторов переменного (ГТ40ПЧ6), постоянного (ГС-12ТО) токов, вентилятора и других навесных агрегатов.

Надежность и ресурс установки определяют:

- сопловые и рабочие лопатки 1-й ступени, а также диски 2-й и 3-й ступеней турбины ($\Pi_{ij} = [\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{21}, \Pi_{22}, \Pi_{31}, \Pi_{32}, \Pi_{41}, \Pi_{42}]$, $j = 1$ – длительная статическая прочность; $j = 2$ – малочиковая прочность);

- радиально-упорный подшипник ротора турбокомпрессора (Π_{53}) и ведущая шестерня редуктора (Π_{63}) ($j = 3$ – контактная прочность);

- элементы генераторов переменного и постоянного токов (Π_{74} и Π_{84}) ($j = 4$ – тепловое старение).

Результаты выбора оптимальных значений режима и длительности УИ для участка нагружения с режимом «номинал» приведены на рис. 3 и в таблице. Из таблицы видно, что испытания

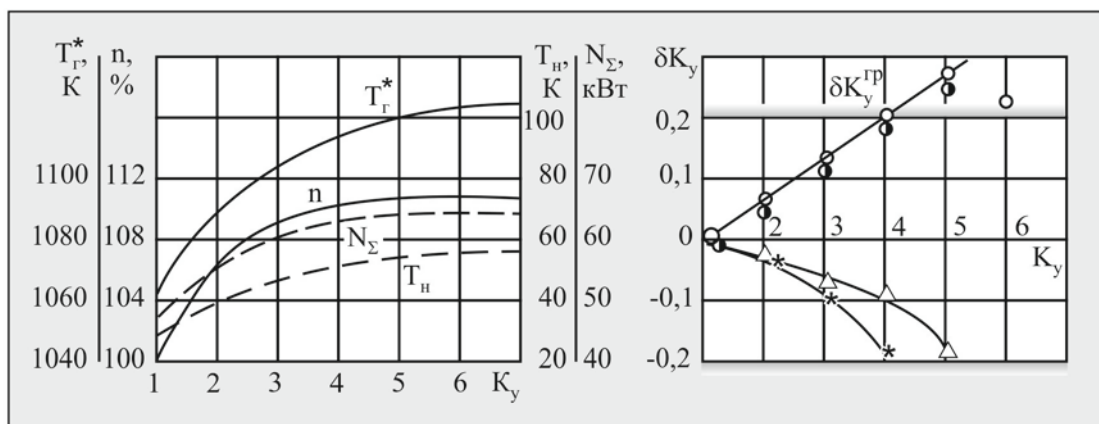


Рис. 3. Зависимость параметров режима ускоренных испытаний газотурбинной силовой установки от коэффициента ускорения: o – турбина; ● – радиально-упорный подшипник; Δ – шестерня; * – генераторы

Таблица

Вид испытаний	Параметры режима						
	$T_{г}^*$, К	N, кВт	z	$T_{н}$, К	$N_{гт}$, кВт	$N_{гс}$, кВА	μ
Длительные	1083	100	1350	302	38	7,4	1,56
Ускоренные	1114	110	1350	322	50	12,0	1,60

являются оптимальными при $K_y = 4$. Общее число переменных режимов в программе ускоренных и длительных испытаний (включая запуски) сохранено одинаковым.

Наработка на критических частотах вращения и резонансных колебаниях лопаток не включена в программу УИ, поскольку критические частоты вращения ротора турбокомпрессора расположены ниже диапазона рабочих и форсированных частот вращения, а резонансные колебания лопаток отсутствуют.

УИ двигателя проводятся с форсированием частоты вращения ротора (n) на 10 %, температуры газа перед турбиной ($T_{г}^*$) – на 31 К, температуры воздуха на входе в двигатель ($T_{н}$) – на 20 К, мощности загрузки генератора переменного тока ($N_{гт}$) – на 12 кВА, генератора постоянного тока ($N_{гс}$) – на 4,6 кВт, температуры элементов генераторов – на 18 К.

Регулирование температуры газа перед турбиной осуществляется расходом воздуха, отбираемым за компрессором.

Регулирование частоты вращения осуществляется винтом регулятора центробежного топливного насоса 892А.

Температура воздуха на входе в двигатель регулируется подачей воздуха, отбираемого за компрессором испытываемой газотурбинной установки.

Температура элементов генераторов постоянного и переменного тока регулируется перекрытием входного сечения в вентилятор (регулируется параметром μ), а также изменением загрузки генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гишваров А. С.** Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем. Уфа: Изд-во "Гилем", 2000. 338 с. [A. S. Gishvarov, *The theory of accelerated life tests of technical systems*, (in Russian). Ufa: Gilem, 2000. 338 p.]
2. **Гишваров А. С., Тимашев С. А.** Теоретические основы ускоренной оценки и прогнозирования надежности технических систем. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 188 с. [A. S. Gishvarov, S. A. Timashev, *Theoretical basis of rapid assessment and prediction of the reliability of technical systems*, (in Russian). Ekaterinburg: UrO RAN, 2012. 184 p.]
3. **Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И.** Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение,

1976. 216 с. [N. D. Kuznetsov, V. I. Tseitlin, *Equivalent tests of gas turbine engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.]

4. **Веников В. А.** Теория подобия и моделирования. М.: Машиностроение, 2014. 205 с. [V. A. Venikov, *Theory of similarity and modeling*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2014. 205 p.]

5. **Гишваров А. С.** Повышение эффективности многокритериального планирования многофакторного эксперимента. М.: Машиностроение, 2014. 205 с. [A. S. Gishvarov, *Improving the efficiency of multi-criteria planning multifactor experiment*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2014. 205 p.]

ОБ АВТОРАХ

ГИШВАРОВ Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Теор. и эксп. исследования в обл. надежности, ресурса и испытаний технических систем.

ДАВЫДОВ Марсель Николаевич, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепл. и ракетн. двигателям ЛА (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. ускоренных испытаний техн. систем.

METADATA

Title: Method of selection parameters of complex accelerated life test power plants.

Authors: A. S. Gishvarov¹, M. N. Davydov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ad@mail.rb.ru, ²mar55@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 1 (71), pp. 62–70, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The actual problem of accelerated test is to provide evidence-based method of selecting the volume, mode and duration of GTE. The solution to this problem provides the basis for the most complete test.

Key words: Power plant; accelerated testing complex; performance criteria; defectiveness; the objective function.

About authors:

GISHVAROV, Anas Saidovich, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

DAVYDOV, Marsel Nikolaevich, Dipl. engineer of aircraft engines (USATU, 2002), Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2006).