

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ УСКОРЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Х. М. ОР-РАШИД¹, А. С. ГИШВАРОВ²

¹ harun_82@mail.ru, ² kafedra.ad@mail.ru

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

Аннотация. Рассмотрен процесс формирования обобщенной модели расходования ресурса вспомогательной силовой газотурбинной установки, на базе которой проведен выбор оптимальных значений режимов и длительности ускоренных периодических испытаний газотурбинной силовой установки. Показано что такой подход позволяет обоснованно проверять надежность и ресурс силовых установок методом ускоренных испытаний.

Ключевые слова: ускоренные испытания; эквивалентность; повреждаемость; обобщенная модель расходования ресурса.

ВВЕДЕНИЕ

Научно обоснованные и хорошо организованные испытания являются залогом успеха и удовлетворения требованиям по надежности выпускаемых изделий при минимальны временных и материальных затратах.

С целью сокращения объема и длительности ресурсных испытаний систем на практике используются методы ускоренных испытаний, обеспечивающие получение необходимой информации о надежности и ресурсе в более короткие сроки.

Ввиду многообразия факторов, определяющих надежность и ресурс изделия, обеспечение эквивалентности испытаний является чрезвычайно сложной задачей. Различное влияние нагружения на повреждаемость элементов изделия, наличие функциональных ограничений на параметры режима нагружения, ограничения на автомобильность испытаний (неизменность физической природы расходования ресурса в ускоренных и длительных испытаниях) являются основными причинами, ограничивающими эффективность ускоренных испытаний.

Обобщенная модель расходования ресурса позволяет, с одной стороны, при за-

данных режимах определять длительность ускоренных испытаний, с другой стороны, для заданной длительности испытаний определять режимы испытаний, т.е. она представляет собой математическую модель ускоренных испытаний [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к ускоренным испытаниям, является обеспечение их эквивалентности длительным испытаниям.

УСЛОВИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ УСКОРЕННЫХ И ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для двух сравниваемых явлений – ускоренных Y_u и длительных Y_n испытаний, процессы которых зависят от факторов x_1, x_2, \dots, x_n и описываются зависимостями

$$\begin{cases} Y_u = \varphi(x_{y1}, x_{y2}, \dots, x_{ym}) \\ Y_n = \varphi(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn}) \end{cases} \quad (1)$$

подобие обеспечивается при тождественности уравнений, описывающих сравниваемые явления, и равенстве сходственных критериев подобия [1,2]. Согласно π – теореме критерии подобия разделяются на определяемый, в котором 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). Применительно к процессам расходования ресурса технических изделий определяемыми параметрами являются обобщенные запасы прочности n_σ , долговечности n_τ , повреждаемости Π , а определяющими – производственно технологические параметры, характеризующие качество изделия (исходное состояние перед испытаниями) $P_0 = (P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0v})^T$, параметры режима нагружения изделия $R(\tau) = (R_1, R_2, \dots, R_s)^T$ и длительность испытаний τ :

$$\begin{cases} \Pi_y = \varphi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y] \\ \Pi_n = \varphi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n] \end{cases} \quad (2)$$

Зависимости вида (2) в теории надежности трактуются как модели разрушения, деградации, утраты работоспособности, выработки ресурса.

Согласно (2), в области исходного состояния G_P и области режимов нагружения G_R при известной функции связи $\Pi = \varphi [P_0, R(\tau), \tau]$, зависимости $\Pi_y = \varphi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y]$ и $\Pi_n = \varphi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n]$ 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 подобие длительных и ускоренных испытаний [1, 4]:

$$\begin{aligned} \varphi [P_{0y}, R_y(\tau), \tau_y] &= \varphi [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_n]; \\ P_{0y} &= C_P P_{0n} = (C_{P1} P_{0n1}, \dots, C_{Pv} P_{0nv})^T; \\ R_n(\tau) &= C_r R_n(\tau) = (C_{r1} R_{n1}, \dots, C_{rs} R_{ns})^T; \\ \tau_y &= C_y \tau_n, \end{aligned} \quad (3)$$

где C_y – множитель подобного преобразования времени при переходе от длительных испытаний к ускоренным

($C_y = K_y^{-1}$; $K_y = \frac{\tau_n}{\tau_y}$ – коэффициент ускорения испытаний).

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

Повреждаемость Π определяется суммированием по участкам нагружения [3]:

$$\Pi = \sum_{i=1}^z \frac{\tau_i}{\tau_i^*}, \quad (4)$$

где τ_i – длительность режима нагружения; τ_i^* – время до разрушения или наступления параметрического отказа ($\tau_i^* = \varphi [P_0, R(\tau)]$); z – число режимов нагружения. В формуле (4) параметр Π является величиной безразмерной (нормализованной по τ^*), т.е. соответствует критериальной форме, поэтому условие подобия ускоренных и длительных испытаний можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{\Pi_n}{\Pi_y} = 1; \\ P_0 &\in G_P; \quad R(\tau) \in G_R. \end{aligned} \quad (5)$$

Различные сочетания параметров P_0 и R внутри областей G_P и G_R , обеспечивающие выполнение условия (5) при $\tau_y < \tau_n$, образуют область ускоренных эквивалентных испытаний. Поскольку надежность изделия определяется n элементами и m характеристиками расходования ресурса, то его повреждаемость можно представить в виде матрицы размера $n \times m$, строки которой соответствуют элементам изделия, а столбцы – характеристикам расходования ресурса:

$$\tilde{\Pi}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{11} & \tilde{\Pi}_{12} & \dots & \tilde{\Pi}_{1m} \\ \tilde{\Pi}_{21} & \tilde{\Pi}_{22} & \dots & \tilde{\Pi}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{\Pi}_{n1} & \tilde{\Pi}_{n2} & \dots & \tilde{\Pi}_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

Таким образом, наличие моделей расходования ресурса вида (2) позволяет расчетным методом определять режимы и длительность ускоренных испытаний в областях определения модели G_P и G_R .

ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

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

- априорно известными моделями;
- моделями, построенными методами

многофакторного регрессионного анализа по статистическим данным эксплуатации (испытаний) изделия и (или) его аналогов в различных условиях (моделирование методом пассивных экспериментов);

– моделями, построенными методом планирования эксперимента (моделирование методом активных экспериментов).

Наличие априорно известных моделей означает, что данный вид моделей известен заранее и они могут быть непосредственно или путем некоторого видоизменения включены в обобщенную модель расходования ресурса изделия.

Авиационная газотурбинная силовая установка состоит из турбокомпрессора, редуктора, генератора переменного тока (ГТ40ПЧ6), генератора постоянного тока ГС-12ТО, вентилятора и других навесных агрегатов.

Надежность и ресурс установки определяют:

– сопловые и рабочие лопатки первой ступени, а также диски второй и третьей ступеней турбины ($\Pi_{ij} = [\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{22}, \Pi_{31}, \Pi_{32}, \Pi_{41}, \Pi_{42}]$, $j = 1$ – длительная статическая прочность; $j = 2$ – малоцикловая 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).

Требуется определить режимы и длительность ускоренных испытаний для основного участка нагружения если известно, что

$$DK_y = 3...10; K_{yij}^{2p} = 0,2; b_{11} = 0,23;$$

$$b_{22} = b_{33} = 0,20; b_{43} = b_{53} = 0,18;$$

$$\rho_{11} = \rho_{22} = \rho_{32} = 0,22; \rho_{43} = \rho_{53} = 0,17,$$

где DK_y – интервал значений коэффициента ускорения испытаний; K_{yij}^{2p} – граничное значение коэффициента ускорения элементов; $b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{43}, b_{53}$ – веса точности моделей расходования ресурса; $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{32}, \rho_{43}, \rho_{53}$ – веса значимости элементов силовой установки.

Обобщенная модель расходования ресурса и модель ускоренных испытаний имеют вид [1]:

$$\Pi_{ij} = \left\{ \begin{array}{cccc} \Pi_{11} & \Pi_{12} & 0 & 0 \\ \Pi_{41} & \Pi_{22} & 0 & 0 \\ \Pi_{31} & \Pi_{32} & 0 & 0 \\ \Pi_{41} & \Pi_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Pi_{53} & 0 \\ 0 & 0 & \Pi_{63} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Pi_{74} \\ 0 & 0 & 0 & \Pi_{84} \end{array} \right\}; \quad (7)$$

$$K_{yij} : \left\{ \begin{array}{l} K_{y11} = F(T_r^*, n, z); K_{y12} = F(z); \\ K_{y21} = F(T_r^*, n, z); K_{y22} = F(z); \\ K_{y31} = F(T_r^*, n, z); K_{y32} = F(z); \\ K_{y41} = F(T_r^*, n, z); K_{y42} = F(z); \\ K_{y53} = F(R_{oc}, n); \\ K_{y63} = F(N_{гг}, N_{гс}, N_{вен}, n_{ш}); \\ K_{y74} = F(T_{гс}); \\ K_{y84} = F(T_{гг}), \end{array} \right.$$

где T_r^* – температура газа перед турбиной, К; $n, n_{ш}$ – соответственно частота вращения ротора и шестерни, %; z – количество запусков двигателя; R_{oc} – осевая нагрузка радиально-упорного подшипника, кгс; $N_{гс}, N_{гг}$ – соответственно мощность загрузки генераторов переменного и постоянного токов, кВт; $N_{вен}$ – мощность вентилятора, кВт; $T_{гс}, T_{гг}$ – соответственно температура «критичных» элементов генераторов переменного и постоянного токов, К.

Параметры режима нагружения $R_{oc}, N_{вен}, n, T_{гс,гг}$, в свою очередь, являются функциями:

$$R_{oc} = F(T_n, n); n = F(n_{ш});$$

$$N_{вен} = F(T_n, n, \mu);$$

$$T_{гс,гг} = (a_0 + a_1 N + a_2 N^2) + \quad (8)$$

$$+ (b_0 + b_1 N + b_2 N^2) \mu +$$

$$+ (c_0 + c_1 N + c_2 N^2) \mu^2 + \delta T_r' + \delta T_r'';$$

где T_n – температура воздуха на входе в двигатель; μ – величина перекрытия входного сечения вентилятора, регулирующего

обдуд генераторов переменного и постоянного токов; $\delta T'_r, \delta T''_r$ – поправки, учитывающие соответственно влияние подогрева воздуха в вентиляторе и влияние частоты вращения.

$$G_R : \begin{cases} H_1 = T_r^* + 3\sigma(T_r^*) + \delta T_r^*(T_n) + C_1 \leq 0; \\ H_2 = T_r^* + a_1 T_n - a_2 n + C_2 \leq 0; \\ H_3 = -T_r^* + a_3 T_n^2 + a_4 n + C_3 \leq 0; \\ H_4 = n - C_4 \leq 0; H_5 = C_5 - n \leq 0; \\ H_6 = T_n - C_6 \leq 0; H_7 = C_7 - T_n \leq 0; \\ H_8 = a_1 P_n a_2 \sqrt{n_{uu}} \times (a_3 + a_4 / P_n)^{a_5} \leq 0; \\ H_9 = N_{гг} + N_{гс} - C_9 \leq 0; \\ H_{10} = C_{10} - N_{гг} + N_{гс} \leq 0; \\ H_{11} = F(N_{всн}, T_n, n, \mu) = 0; \\ H_{12} = F(n, n_{uu}) = 0; \\ H_{13} = F(R_{ос}, T_n, n) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где H_1 – ограничение по T_r^* ; $\sigma(T_r^*)$ – среднеквадратическое отклонение T_r^* ; $\delta T_r^*(T_n)$ – поправка, учитывающая влияние T_n на T_r^* ; H_2, H_3 – ограничения, учитывающие функциональную связь параметров T_r^*, T_n и n ; H_4, H_5 – ограничения по n ; H_6, H_7 – ограничения по T_n ; H_8 – ограничение по отсутствию заедания шестерни (P_n – удельная нагрузка зуба шестерни, a_1, a_2, \dots, a_5 – константы); H_9, H_{10} – ограничения по $N_{гс}$ и $N_{гг}$; H_{11}, H_{12}, H_{13} – функциональные ограничения, обусловленные конструктивными особенностями двигателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫБОРА РЕЖИМОВ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Результаты оптимизации режима и длительности ускоренных испытаний для участка нагружения «номинал» показывают (рис.1, табл. 1), что оптимальным является режим с $K_y = 4$. Общее число переменных режимов в программе ускоренных и длительных испытаний (включая запуски) сохранено одинаковым.

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

Ускоренные испытания двигателя проводятся с форсированием частоты вращения ротора на 10 %, температуры газа перед турбиной – на 31 К, температуры воздуха на входе в двигатель – на 20 К, мощности загрузки генератора переменного тока – на 12 кВА, мощности загрузки генератора постоянного тока – на 4,6 кВт, температуры элементов генераторов – на 18 К.

Регулирование T_r^* осуществляется отбором воздуха за компрессором. Регулирование частоты вращения осуществляется винтом центробежного регулятора насоса 892 А. Температура воздуха на входе в двигатель регулируется подачей воздуха, отбираемого за компрессором испытываемого двигателя. При необходимости воздух подается от технологического двигателя, устанавливаемого в другом боксе.

Температура элементов генераторов постоянного и переменного тока регулируется перекрытием входного сечения в вентилятор и изменением загрузки генератора. Температура элементов генераторов постоянного и переменного тока регулируется перекрытием входного сечения в вентилятор и изменением загрузки генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительные ускоренные испытания силовых установок, проведенные на режимах, рассчитанных по рассмотренному в данной статье методу и по серийно используемому в отрасли методу (расчет режима в данном случае проводился по лимитирующему ресурс силовой установки элементу – рабочей лопатке 1-ой ступени турбины), показали, что в первом случае эффективность ускоренных испытаний, оцениваемая уровнем обеспечения эквивалентности, выше:

- в 29 раз по элементам, с учетом которых проводилась оптимизация режимов и длительности ускоренных испытаний;
- в 1,8 раз по износу роторных подшипников;
- в 1,6 раз по изменению газодинамических параметров;
- в 1,8 раз по изменению остальных параметров (выбегу ротора, дисбалансу и др.).

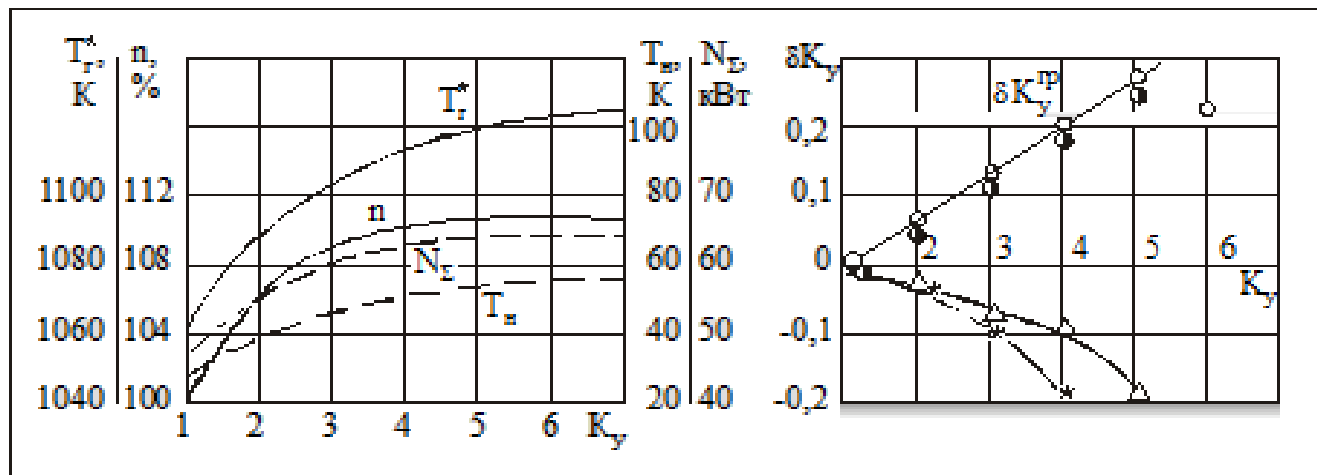


Рис. 1. Зависимость параметров режима ускоренных испытаний двигателя от коэффициента ускорения на участке нагружения «номинал»: о – турбина; ● – радиально-упорный подшипник; Δ – шестерня; * – генераторы

Таблица 1

Параметры режима при длительных и ускоренных испытаниях

Вид испытаний	Параметры режима						
	T_{z}^* , К	N_z , кВт	z	T_n , К	N_{zm} , кВт	N_{zc} , кВА	μ
Длительные	1083	100	1350	302	38	7,4	1,56
Ускоренные	1114	110	1350	322	50	12,0	1,60

В целом по силовой установке как показало исследование, эффективность ускоренных испытаний, обоснованных по рассмотренной методике, в 2 раза выше, что позволяет более обоснованно проверять надежность и ресурс силовых установок методом ускоренных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гишваров А.С., Теория ускоренных испытаний технических систем. Уфа: Гилем, 2000. 338 с. [A.S. Gishvarov, Theory of Accelerated Testing of Technical Systems, (in Russian). Ufa: Gilem, 2000]
2. Веников В.А., Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1976. 480 с. [V.A. Venikov, Similarity theory and modeling. M.: Higher school, 1976]
3. Биргер И.А., Ресурс и эквивалентные испытания авиационных двигателей // Испытания авиационных двигателей. Уфа, 1976. №4. С. 17-48. [I.A. Birger, Resource and Equivalent Tests of Aircraft Engines // Tests of Aircraft Engines. Ufa, 1976]

ОБ АВТОРАХ

ОР-РАШИД Харун Мохаммад, асп. каф. авиационных двигателей. Дипл инженер по тех. экпл. ЛА и АД (УГАТУ, 2011). Исс. в обл. ускоренных испытаний авиационных ГТД.

ГИШВАРОВ Анас Саидович, проф, зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям лета-тельных аппаратов (УАИ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса, испытаний и прогнозирования состояния технических систем.

METADATA

Title: Substantion of modes and duration of accelerated periodic tests of gas-turbine power plant
 Author: H. M. Or-Rashid ¹, A. S. Gishvarov.²
 Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia
 E-mail: ¹ harun_82@mail.ru, ² kafedra.ad@mail.ru
 Language: Russian
 Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (23), pp. 108-113, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: the process of forming a generalized model of the resource consumption of the auxiliary power gas turbine installation on the basis of which the choice of the optimal values of the modes and the duration of the accelerated periodic tests is considered.

Key words: accelerated testing, equivalence, damage, generalized model of resource consumption.

About authors:

OR-RASHID Harun Mohammad, Postgrad. (PhD) student, Dept. of Aircraft engines. Dipl. Engineer Technical Maintenance of Aircraft and Aircraft Engines (USATU, 2011). Research in the domain of accelerated testing of aircraft GTE.

GISHVAROV Anas Saidovich, prof. cafe Aviation Engine Dipl. engineer-fur. by aviation engine (UAI, 1973). Doctor tech. sciences in heat. engines of flying vehicles (UAI, 1993). Research in the region reliability, resource, testing and prediction of the state of technical systems.