

А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов, Г. К. Агеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проведено исследование оптимальной области реализации ускоренных ресурсных испытаний газотурбинного двигателя многовариантного применения, где эффективность выбора оптимального варианта ускоренных испытаний определяет параметр, зависящий от многих факторов: вида целевой функции, применяемой для оптимизации параметров испытаний; режима испытаний; числа элементов и узлов двигателя, определяющих его надежность и ресурс; числа участков нагружения, на которых проводится оптимизация ускоренных испытаний; количества двигателей, выделяемых на испытания и др. Исследование проведено на примере маршевого газотурбинного двигателя, эксплуатируемого по шести вариантам применения. *Газотурбинный двигатель многовариантного применения; ускоренные ресурсные испытания; исследование; оптимальная область*

Проблема обоснования ускоренных ресурсных испытаний является особенно актуальной для двигателей и агрегатов, которые устанавливаются на нескольких типах объектов и эксплуатируются в различных климатических зонах и режимах нагружения. Известно, например, что вспомогательная газотурбинная силовая установка ТА-6А устанавливается на четырех типах самолетов и других наземных объектах; двигатель ТФ34 устанавливается на штурмовике А-10 и противолодочном самолете S-3А; двигатель Т53-L-13 эксплуатируется на железнодорожном транспорте и устанавливается на двух типах вертолетов; авиационный турбогенератор ТГ-60/2СМ устанавливается на 8 типах объектов и т. д. Такие двигатели квалифицируются как двигатели многовариантного применения.

Выбор оптимальных значений параметров ускоренных ресурсных испытаний зависит от многих факторов, основными из которых являются [1–5]:

- вид целевой функции, применяемой при оптимизации параметров испытаний;
- режим и длительность нагружения двигателя в испытаниях;
- количество «критичных» элементов узлов двигателя, с учетом которых проводится выбор объема, режимов и длительности испытаний;
- число участков нагружения, на которых проводится оптимизация режимов и длительности испытаний;

- количество двигателей, выделяемых на испытания и др.

Исследование эффективности ускоренных ресурсных испытаний проводилось на примере ракетного газотурбинного двигателя, эксплуатируемого по шести вариантам применения.

С учетом данных прочностных расчетов оптимизация режимов и длительности ускоренных ресурсных испытаний проводилась с учетом следующих «критичных» элементов узлов двигателя:

- рабочей и сопловой лопаток турбины;
- рабочей и направляющей лопаток первой ступени компрессора;
- направляющей лопатки шестой ступени компрессора;
- корпуса камеры сгорания;
- радиально-упорного подшипника ротора;
- ведущей шестерни привода агрегатов.

Режим нагружения двигателя задавался температурой $T_{вх}^*$ и давлением $P_{вх}^*$ воздуха на входе в двигатель и относительной частотой вращения ротора \bar{n} .

При исследовании учитывались:

- ограничения по повреждаемости элементов узлов двигателя:

$$\bar{\Pi}_{ит} \geq \max_i \bar{\Pi}_{эит}, \quad i = \overline{1, 8}; \quad (1)$$

- ограничения, задаваемые из условия обеспечения гарантированной проверки надежности двигателя в переменных режимах нагружения:

$$|\partial R / \partial \tau| \leq |\partial R / \partial \tau|_{гр}, \quad (2)$$

где $|\partial R / \partial \tau|_{\text{гр}}$ – граничное значение скорости изменения параметра режима нагружения $\partial R / \partial \tau$, соответствующее максимальному эксплуатационному значению:

$$\begin{aligned} |\partial T_{\text{вх}}^* / \partial \tau| &\leq 1,5 \text{ К / с;} \\ |\partial P_{\text{вх}}^* / \partial \tau| &\leq 0,025 \text{ (кГ/см}^2\text{)/с;} \\ |\partial \bar{n} / \partial \tau| &\leq 0,25 \% / \text{с;} \end{aligned} \quad (3)$$

• ограничения, обусловленные возможностями испытательного стенда:

$$\begin{aligned} 240 &\leq T_{\text{вх}}^* \leq 623 \text{ К;} \\ 0,7 &\leq P_{\text{вх}}^* \leq 10 \text{ кГ/см}^2; 80 \leq \bar{n} \leq 102 \% \end{aligned} \quad (4)$$

• ограничения, обусловленные неразрывностью траектории нагружения двигателя в испытаниях.

Реализация принципа гарантированной проверки надежности двигателя обеспечивалась выбором параметров испытаний минимизацией функционала Φ_1 , представляющего собой суммарную разницу между повреждаемостью элементов двигателя в испытаниях и их повреждаемостью, накапливаемой в наиболее тяжелых эксплуатационных условиях нагружения [2, 3]. Поскольку на практике возможны различные виды представления функционала Φ_1 , то для оптимизации ускоренных ресурсных испытаний решалась задача выбора наилучшего из них. Исследовались следующие виды функционала Φ_1 :

$$\Phi_1^{(1)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\delta \Pi_{ijk}^{(1)}|; \quad (5)$$

$$\Phi_1^{(2)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(1)})^2; \quad (6)$$

$$\Phi_1^{(3)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\delta \Pi_{ijk}^{(2)}|; \quad (7)$$

$$\Phi_1^{(4)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(2)})^2; \quad (8)$$

$$\Phi_1^{(5)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(1)})^2 \times \quad (9)$$

$$\times (\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k);$$

$$\Phi_1^{(6)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(2)})^2 \times \quad (10)$$

$$\times (\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k);$$

$$\Phi_1^{(7)} = \min \left\{ \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(2)})^2 + \right. \\ \left. + n \cdot \left[\frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\delta \Pi_{ijk}^{(1)}) \right]^2 \right\}; \quad (11)$$

$$\Phi_1^{(8)} = \min \left\{ -\exp\left(-\frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \exp(-\delta \Pi_{ijk})\right) \right\}; \quad (12)$$

$$\delta \Pi_{ijk} = 5 - 0,5 \cdot |\delta \Pi_{ijk}^{(2)}| \cdot 100\%;$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1^{(9)} &= -\min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta_{ijk}; \\ \delta_{ijk} &= 1 \quad \text{при} \quad \Pi_{1ijk} \leq \Pi_{uijk} [P_{0u}, R_u(\tau), \tau_u] \leq \\ &\leq \Pi_{2ijk}; \\ \delta_{ijk} &= 0 \quad \text{при} \quad \Pi_{uijk} [P_{0u}, R_u(\tau), \tau_u] < \\ &< \Pi_{1ijk} \wedge \Pi_{uijk} [P_{0u}, R_u(\tau), \tau_u] > \Pi_{2ijk}, \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\Pi_{1ijk} = (\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k);$$

$$\Pi_{2ijk} = \{0,2, 0,9, 0,01, 0,01, 0,2, 0,1, 0,5, 0,1\},$$

$$\begin{aligned} \delta \Pi_{ijk}^{(1)} &= \Pi_{uijk} [P_{0u}, R_u(\tau), \tau_u] - \\ &- (\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta \Pi_{ijk}^{(2)} &= \frac{\Pi_{uijk} [P_{0u}, R_u(\tau), \tau_u]}{(\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k)} - \\ &- \frac{(\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k)}{(\max_l \Pi_{\vartheta ij} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]_k)}; \end{aligned}$$

$\Pi_{\vartheta} [P_{0\vartheta}, R_{\vartheta}(\tau), \tau_{\vartheta}]$, $\Pi_{ui} [P_{0ui}, R_{ui}(\tau), \tau_{ui}]$ – повреждаемость элементов двигателя в эксплуатации и испытаниях соответственно; N_{ϑ} – число эксплуатационных вариантов применения; n , m – число элементов и характеристик расходования ресурса двигателя, с учетом которых проводится оптимизация параметров режимов и длительности ускоренных ресурсных испытаний.

Целевые функции (5) и (7) минимизируют абсолютную и относительную «невязку» по повреждаемости $\delta \Pi$.

Целевые функции (6) и (8), в отличие от функций (5) и (7), минимизируют квадратичную «невязку» абсолютных и относительных значений повреждаемости.

Целевые функции (9) и (10), в отличие от (6) и (8), включают множитель в виде максимальной эксплуатационной повреждаемости, который по сути выполняет роль коэффициента штрафа: чем больше «невязка» между повреждаемостями Π_{ui} и $\max \Pi_{\vartheta}$, тем больше значение минимизируемой функции.

Целевая функция (11) включает два слагаемых: первое – функцию (8), второе – коэффициент штрафа: чем больше «невязка» между Π_{ui} и $\max \Pi_{\vartheta}$ по возможно большему числу элементов двигателя, тем больше величина штрафа целевой функции.

Целевая функция (12) представляет собой обобщенный параметр оптимизации – функцию Харингтона [2], получаемую преобразованием значений нескольких параметров оптимизации y_p в безразмерную шкалу желательности и позволяющую строить соответствующие им частные функции желательности d .

ВЛИЯНИЕ ВИДА ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Целевая функция (13) представляет собой дискретную целочисленную функцию и фактически максимизирует число элементов двигателя, повреждаемость которых находится в интервале:

$$P_{1ijk} \leq P_{yijk} \leq P_{2ijk}. \quad (14)$$

Можно отметить следующие положительные и отрицательные стороны целевых функций (5)...(13):

- целевая функция (5) является по виду наиболее простой из рассматриваемых. Ее основной недостаток заключается в том, что повреждаемость всех элементов двигателя должна быть одного порядка, в противном случае, в первую очередь, минимизируются «невязки» между Π_n и $\max \Pi_3$ для элементов с большей повреждаемостью, что усложняет выполнение принципа гарантированной проверки надежности по остальным элементам двигателя. Следует также учитывать, что ввиду линейного характера функции ухудшается сходимость процесса поиска ее экстремума;

- целевая функция (6) является квадратичной, т. е. гарантированно имеет экстремум, что облегчает поиск минимума Φ_1 (ускоряется сходимость процесса поиска экстремума), но применима для двигателя, элементы которого имеют повреждаемость одного порядка;

- целевая функция (7) не имеет экстремума, но, в отличие от функции (6), применима для двигателя, элементы которого имеют повреждаемость, отличающуюся на несколько порядков;

- целевая функция (8) имеет экстремум и применима для двигателя, элементы которого имеют повреждаемость, отличающуюся на несколько порядков;

- целевая функция (9) имеет положительное качество, отмеченное выше, но не учитывает различия в уровне повреждаемостей элементов двигателя;

- целевая функция (10), ввиду наличия сомножителя ($\max \Pi_{3ijl}$), менее эффективна по сравнению с функцией (8) для двигателя, повреждаемость элементов которого отличается на несколько порядков;

- целевая функция (11) аккумулирует в себе преимущества и недостатки целевых функций (5) и (8);

- целевая функция (12) основана на преобразовании натуральных значений частных критериев эффективности в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности и ее эффективность зависит от назначаемых исследователем приоритетов одних критериев эффективности перед другими;

- целевая функция (13) зависит от граничных значений параметра Π_{nijk} и, ввиду целочисленности аргумента δ_{ijk} , усложняет поиск экстремума функции.

Сравнение эффективности целевых функций (5)...(13) по показателю:

$$\Phi_{cp} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\delta \Pi_{ijk}^{(2)}| \cdot 100\% \quad (N_n = 1);$$

$$\delta \Pi_{ijk}^{(2)} = \frac{\Pi_{u ij} [P_{0n}, R_n(\tau), \tau_u]}{\max_l \Pi_{3ijl} [P_{03}, R_3(\tau), \tau_3]} - \frac{\max_l \Pi_{3ijl} [P_{03}, R_3(\tau), \tau_3]}{\max_l \Pi_{3ijl} [P_{03}, R_3(\tau), \tau_3]}, \quad (15)$$

(согласно которому, чем меньше (в %) абсолютная величина относительной «невязки» между повреждаемостями Π_n и $\max \Pi_3$, тем выше эффективность ускоренных ресурсных испытаний) показало, что наиболее эффективной является целевая функция вида:

$$\Phi_1^{(4)} = \min \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\delta \Pi_{ijk}^{(2)}]^2, \quad (16)$$

режимы и длительность испытаний выбранные по которой позволяют проверять надежность всех элементов узлов двигателя ($n_{зач} = 8$). Применение функции при выборе параметров ускоренных ресурсных испытаний повышает эффективность по показателю (15) в 2500 раз по сравнению с эффективностью серийных ускоренных ресурсных испытаний.

Второй по эффективности является целевая функция (11), режимы и длительность испытаний выбранные по которой позволяют также проверять все элементы узлов двигателя, но при несколько большем значении «невязок» по повреждаемости.

Таким образом, для решения практических задач по выбору оптимальных значений параметров режимов и длительности ускоренных ресурсных испытаний газотурбинных двигателей многовариантного применения может быть рекомендована целевая функция (8).

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ

Очевидно, что каждый из параметров режима нагружения: температура $T_{вх}^*$ и давление $P_{вх}^*$ на входе в двигатель, частота вращения ротора двигателя \bar{n} по-разному влияют на повреждаемость элементов узлов двигателя и для ускоренных испытаний важно выделить наиболее значимые режимы нагружения, что позволит ускоренно проверять надежность и ресурс двигателя.

При исследовании параметры $T_{вх}^*$, $P_{вх}^*$ и \bar{n} на каждом участке испытаний сохранялись постоянными и равными экстремальным (минимальным или максимальным) значениям, при этом общее число вариантов сочетаний значений параметров режима составляло $2^3 = 8$.

Значения коэффициентов влияния параметров режима $T_{вх}^*$, $P_{вх}^*$ и \bar{n} на повреждаемость элементов узлов двигателя приведены в таблице.

Исследование показало, что наибольшее влияние на повреждаемость рабочей лопатки турбины соответствует режиму $T_{вх \min}^*$, $P_{вх \max}^*$ и \bar{n}_{\max} . Наиболее сильное влияние на всех траекториях полета оказывает частота вращения ротора двигателя – при увеличении \bar{n} на 1 % повреждаемость лопатки возрастает в среднем в 3 (2,85...3,1) раза. Наиболее слабое влияние оказывает режим ($T_{вх \min}^*$, $P_{вх \max}^*$ и \bar{n}_{\min}).

Обобщая результаты исследования, получены следующие выводы:

- режим ($T_{вх \min}^*$, $P_{вх \max}^*$ и \bar{n}_{\max}) является наиболее значимым для рабочих и сопловых лопаток турбины, направляющих лопаток компрессора и радиально-упорного подшипника;
- режим ($T_{вх \max}^*$, $P_{вх \min}^*$ и \bar{n}_{\max}) является наиболее значимым для рабочих лопаток компрессора;
- режим ($T_{вх \max}^*$, $P_{вх \max}^*$ и \bar{n}_{\max}) является наиболее значимым для камеры сгорания.

Коэффициенты влияния параметров режима нагружения $T_{вх}^*$, $P_{вх}^*$ и \bar{n} на повреждаемость элементов двигателя

Элемент двигателя	Коэффициент влияния		
	$\partial\Pi/\partial T_{вх}^*$	$\partial\Pi/\partial P_{вх}^*$	$\partial\Pi/\partial \bar{n}$
Рабочая лопатка турбины	0,97	1,02	2,98
Сопловая лопатка турбины	1,13	1,00	2,73
Рабочая лопатка компрессора	3,44	1,00	3,10
Направляющая лопатка первой ступени компрессора	2,25	2,32	2,26
Направляющая лопатка последней ступени компрессора	1,03	1,38	4,00
Корпус камеры сгорания	1,44	1,13	2,18
Подшипник опоры	0,92	1,00	1,15
Шестерня привода агрегатов	1,00	1,00	1,00

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА «КРИТИЧНЫХ» ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В процессе исследования количество элементов, учитываемых при оптимизации ускоренных ресурсных испытаний варьировалось в интервале $n \in 1 \dots 8$ (надежность ведущей шестерни привода агрегатов оценивалась контактной и изгибной прочностью).

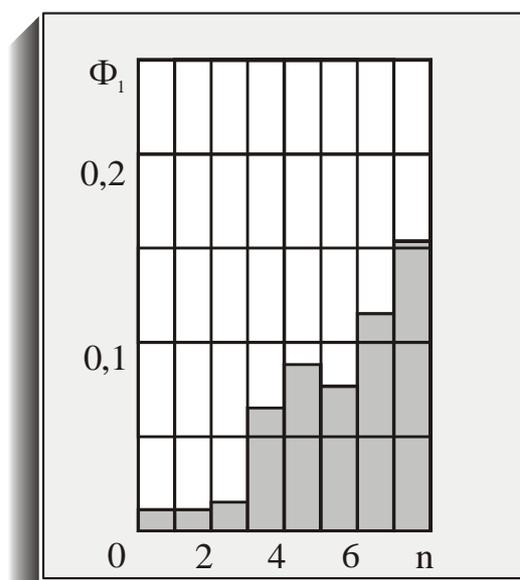
Параметры режима выдерживались в пределах:

$$\begin{aligned} 240 &\leq T_{вх}^* \leq 623 \text{ К;} \\ 0,7 &\leq P_{вх}^* \leq 10 \text{ кг/см}^2; \\ 80 &\leq \bar{n} \leq 102 \%. \end{aligned} \quad (17)$$

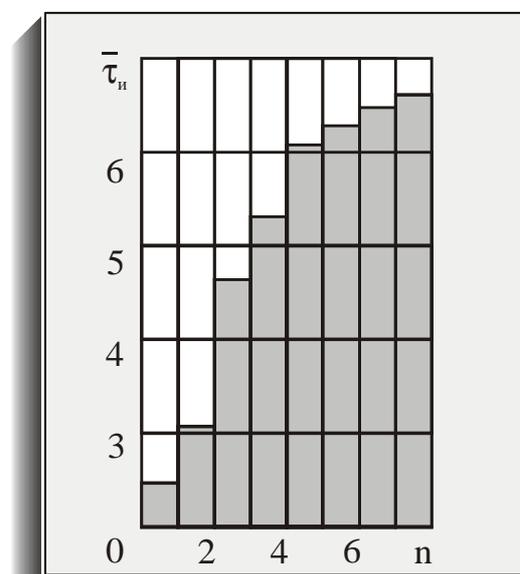
Количество интервалов нагружения, на которых варьировались режим и длительность испытаний, соответствовало их оптимальному значению ($z = 4$).

Исследование показало (рис. 1), что увеличение количества элементов ведет к увеличению длительности испытаний и к снижению их эффективности по критерию Φ_1 : при увеличе-

нии количества элементов от 1 до 8 длительность испытаний возрастает в 3,4 раза, а их эффективность по критерию Φ_1 падает в 14 раз. Для рассматриваемого двигателя возможна гарантированная проверка надежности всех шести эксплуатационных вариантов применения в одних ускоренных ресурсных испытаниях.



а



б

Рис. 1. Влияние количества элементов узлов двигателя, учитываемых при оптимизации ускоренных ресурсных испытаний, на критерий эффективности Φ_1 (а) и длительность испытаний $\bar{\tau}_n$ (б)

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОПТИМИЗИРУЕМЫХ УЧАСТКОВ НАГРУЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Эффективность ускоренных ресурсных испытаний зависит от количества участков нагружения, на которых оптимизируются режимы и длительность нагружения: чем больше количество участков нагружения, тем с большей вероятностью возможно достижение экстремума целевой функции.

При исследовании количество участков нагружения изменялось от минимального ($z = 1$) до максимального ($z = 8$) эксплуатационных значений z .

Анализировались все девять целевых функций (5)...(13).

Результаты исследования показали, что существует пороговое значение количества оптимизируемых участков нагружения $z = z^*$, выше которого эффективность испытаний практически не меняется. Для каждой целевой функции существует свое пороговое значение.

Установлено, что целевая функция (8) является лучшей, поскольку в данном случае испытания обеспечивают гарантированную проверку надежности двигателя, включая меньшее число участков нагружения. Результаты оптимизации параметров испытаний приведены на рис. 2.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВЫДЕЛЯЕМЫХ НА ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Количество двигателей варьировалось от 1 (случай, когда все элементы узлов двигателя проверяются на одном двигателе) до 8 (случай, когда каждый элемент проверяется на отдельном двигателе). При $N_n > 1$ испытания проводятся на нескольких стендах. Целью исследования являлось определение количества двигателей, достаточного для проверки его надежности по всем шести эксплуатационным вариантам применения.

Эффективность испытаний оценивалась значением целевой функции Φ_1 и длительностью испытаний $\bar{\tau}_n$.

При исследовании анализировались все возможные варианты сочетания элементов (всего 255), проверяемых на одном двигателе. Например, при $N_n = 2$ возможны следующие вари-

анты проверки надежности элементов узлов двигателя:

- полная проверка надежности элементов 1, 2, 3 и 4 обеспечивается испытаниями на одном двигателе, а элементов 5, 6, 7 и 8 – на другом двигателе;

- элементов 1, 3 и 5 обеспечивается на одном двигателе, а элементов 2, 4, 6, 7 и 8 – на другом двигателе и т. д.

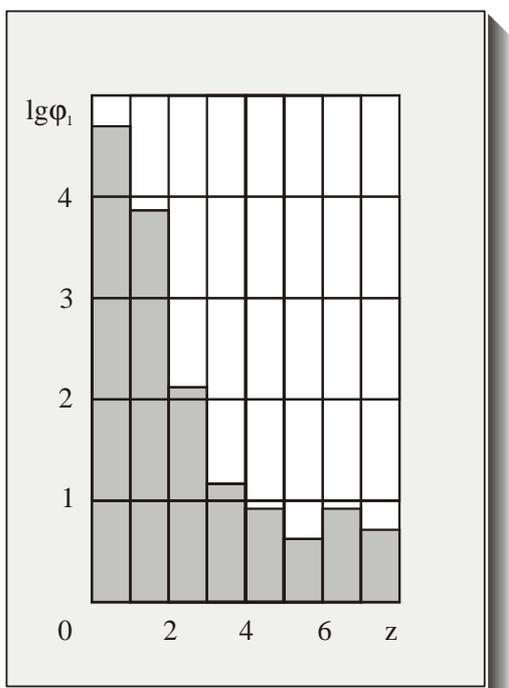


Рис. 2. Влияние количества участков нагружения, на которых оптимизируются режимы и длительность испытаний двигателя, на критерий эффективности

Из всех возможных вариантов за окончательный принимался вариант с наименьшим значением критерия Φ_1 . Результаты исследования показали (рис. 3), что:

- оптимальное значение количества двигателей N_n^* , выделяемых на испытания, зависит от вида используемой при оптимизации параметров испытаний целевой функции и требуемой точности решения, оцениваемой показателем:

$$\delta\Pi_{\Sigma} = \left| \delta\Pi_{ijk}^{(2)} \right| \leq (\delta\Pi_{\Sigma})_{\text{доп}}, \quad (18)$$

где $(\delta\Pi_{\Sigma})_{\text{доп}}$ – допустимое предельное значение «невязки» $\delta\Pi_{\Sigma}$ (например, оптимизация испытаний по функции цели (8) показала, что при $(\delta\Pi_{\Sigma})_{\text{доп}} = 1,0$ достаточно провести испытания одного двигателя, при $(\delta\Pi_{\Sigma})_{\text{доп}} = 0,5$ – двух двигателей и т. д.);

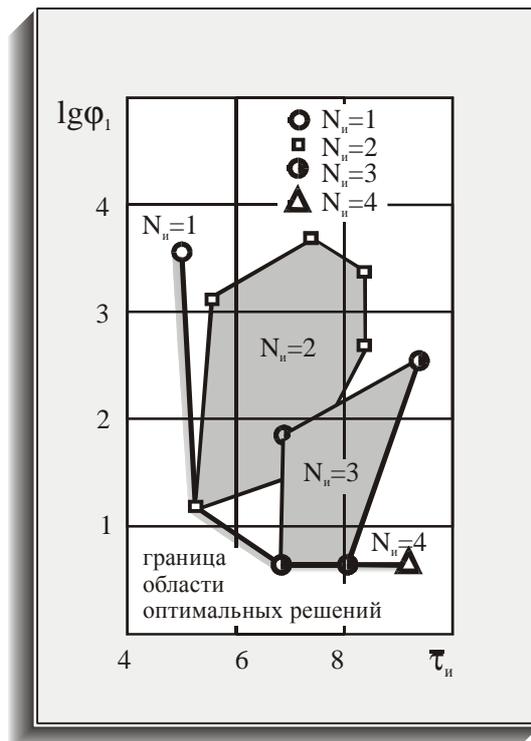


Рис. 3. Влияние количества испытываемых двигателей N_n и длительность испытаний $\bar{\tau}_n$, оцениваемую критерием Φ_1

- уменьшение количества стендов (что равносильно увеличению числа эксплуатационных вариантов, проверяемых в одних ускоренных ресурсных испытаниях) ведет к сокращению длительности испытаний и к ухудшению их эффективности по критерию гарантированной проверки надежности: проведение испытаний одного двигателя, вместо четырех, приведет к сокращению длительности испытаний в 2 раза и к снижению уровня гарантированной проверки надежности двигателя ~ в 6 раз;

- существует пороговое (минимальное) значение количества испытываемых двигателей $N_n^* = \min_i N_{yi}$, при котором обеспечивается гарантированная проверка надежности всех его эксплуатационных вариантов применения.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее эффективной для выбора оптимальных значений параметров режимов и длительности ускоренных ресурсных испытаний двигателей, обеспечивающих гарантированную проверку надежности, является целевая функция вида (8).

2. Для каждого элемента узла или группы элементов узлов двигателя существует опреде-

ленное сочетание параметров режима нагружения, являющееся наиболее повреждающим в условиях эксплуатации. Для газотурбинного двигателя, режим нагружения которого задается сочетанием температуры ($T_{вх}^*$), давления ($P_{вх}^*$) воздуха на входе в двигатель и частоты вращения ротора (\bar{n}), наиболее повреждающими являются следующие сочетания экстремальных значений параметров режима $T_{вх}^*$, $P_{вх}^*$ и \bar{n} :

- режим [$T_{вх\ min}^*$, $P_{вх\ max}^*$, \bar{n}_{max}] – для рабочих и сопловых лопаток турбины, направляющих лопаток компрессора и радиально-упорного подшипника;
- режим [$T_{вх\ max}^*$, $P_{вх\ min}^*$, \bar{n}_{max}] – для рабочих лопаток компрессора;
- режим [$T_{вх\ max}^*$, $P_{вх\ max}^*$, \bar{n}_{max}] – для камеры сгорания.

3. Увеличение количества элементов, с учетом которых проводится оптимизация параметров ускоренных испытаний, ведет к увеличению длительности испытаний и к снижению их эффективности в плане обеспечения гарантированной проверки надежности, оцениваемой критерием Φ_1 : при увеличении количества элементов от 1 до 8 длительность испытаний возрастает в 3,4 раза, а их эффективность по критерию Φ_1 падает в 14 раз.

4. Существует пороговое значение числа оптимизируемых участков нагружения $z = z^*$, выше которого эффективность испытаний практически не меняется. Значение z^* зависит от вида применяемой целевой функции: в этом плане наилучшей является целевая функция (8).

Оптимальное количество двигателей, выделяемых на испытания, зависит (при прочих равных условиях) от вида используемой целевой функции и требуемой точности решения.

Уменьшение количества двигателей ведет к сокращению длительности испытаний и к ухудшению их эффективности по критерию гарантированной проверки надежности: так, проверка надежности двигателя, эксплуатируемого в шести вариантах применения, испытаниями одного двигателя вместо четырех, приводит к сокращению длительности испытаний в 2 раза и к снижению их эффективности по

критерию гарантированной проверки надежности $\Phi_1 \sim$ в 6 раз.

Существует пороговое (минимальное) значение количества испытываемых двигателей, при котором с заданной точностью обеспечивается гарантированная проверка надежности всех эксплуатационных вариантов применения двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гишваров А. С., Идрисов Р. Т. Анализ факторов, влияющих на формирование обобщенного цикла испытаний авиационных ГТД // Испытания авиационных двигателей: межвуз. научн. сб. Уфа: 1986. № 14. С. 24–31.
2. Гишваров А. С. Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем. Уфа: Гилем, 2000. 350 с.
3. Гишваров А. С. Параметрическая оптимизация ресурсных испытаний энергетических установок летательных аппаратов многовариантного применения // Вестник УГАТУ. 2002. Т. 3, № 2. С. 46–66.
4. Guishvarov A. S. Development technology of the programs of reliability and length of life accelerated tests of aircraft engines // Proc. of the 1997 Cina-Russia Symp. on Aero-Engines. Nahjing, China, 1997. P. 47–52.
5. Guishvarov A. S., Kondratieva N. V., Minigaleev S. M. Development technology of the programs of reliability and length of life accelerated tests of aircraft engines // 36th AIAA // ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Huntsville, Alabama, 2000. P. 36–38.

ОБ АВТОРАХ

Гишваров Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.

Давыдов Марсель Николаевич, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепл. и электро-ракетн. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 2006).

Агеев Георгий Константинович, ст. преп. той же каф. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 2007).