УДК 621.452

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕННЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2006 С.М. Минигалеев

Уфимский государственный авиационный технический университет

Для проверки надежности изделий, расходование ресурса которых в эксплуатации может протекать по различным вариантам, рациональным является проведение ускоренных совмещенных испытаний. Рассмотрены критерии, характеризующие основные требования, предъявляемые к УСИ, для выбора оптимальных режимов и объема УСИ.

Для проверки надежности изделий, расходование ресурса которых в эксплуатации может протекать по различным вариантам, рациональным является проведение ускоренных совмещенных испытаний (УСИ).

Критерий гарантированной проверки надежности изделия

Для изделия, устанавливаемого на различные объекты и эксплуатируемого в различных условиях, обеспечить условие эквивалентности одновременно по всем $N_э$ вариантам применения в одних ускоренных испытаниях невозможно ($П_{у\,ij} \neq П_{э\,ijl}$, где $П_у$, $П_э$ – соответственно ресурс, расходуемый в ускоренных и эксплуатационных условиях, $i=\overline{1,n}$ – число элементов узлов изделия; $j=\overline{1,m}$ – число характеристик расходования ресурса; $l=\overline{1,N_э}$ – число эксплуатационных вариантов применения), т.е. в данном случае принцип эквивалентности в виде равенства повреждаемостей становится неприемлемым и требуется иной подход к проверке надежности, основная идея которого сводится к тому, что формирование ускоренных испытаний проводится из условия обеспечения гарантированной проверки надежности изделия одновременно по нескольким (в предельном случае – по всем) эксплуатационным вариантам применения.

Очевидно, что гарантированная проверка надежности изделия по $N_э$ вариантам обеспечивается при

$$П_у = \max_l П_{эl}, \quad l=\overline{1,N_э}, \qquad (1)$$

поскольку в противном случае всегда найдется такой вариант "x", для которого $П_у = П_{эx}$. Так, например, при $n = 1$, $m = 1$ и $N = 2$ успешно проведенные испытания, удовлетворяющие условию $П_у = \max\,[П_{э1}, П_{э2}]$, гарантируют надежность изделия при эксплуатации по обоим вариантам применения, поскольку в таких испытаниях воспроизводится максимальная из двух повреждаемостей элемента изделия. При этом не требуется выполнение условия эквивалентности одновременно по всем элементам и характеристикам расходования ресурса изделия.

Если в теории ускоренных испытаний условие равенства вырабатываемых ресурсов соответствует принципу эквивалентности ускоренных и длительных (эксплуатационных) испытаний, то условие (1) – принципу гарантированной проверки в ускоренных испытаниях надежности изделия многовариантного применения.

В частном случае, при $l = N = 1$ $П_{уij} = = П_{эij}$, принцип гарантированной проверки надежности вырождается в принцип эквивалентности.

Для изделия в целом с учетом n элементов и m характеристик ресурса условие гарантированной проверки надежности можно записать в виде

$$П_{у\,ij} = \max_l П_{э\,ijl} \ . \qquad (2)$$

При $n \wedge m >> 1$ и $s << n \wedge m$ (s – число параметров режима нагружения $R = (R_1, R_1,\ldots, R_s,))$ для современных сложных технических изделий выполнить условие (2) по всем элементам и характеристикам ресурса невозможно, поэтому необходим компромисс, основная идея которого сводится к приближенному выполнению принципа гарантированной проверки надежности, в виде:

$$П_{у\,ij} \geq \max_l П_{э\,ijl} \ . \qquad (3)$$

Условие (3) означает, что для ряда элементов изделия УСИ будут проводиться с оценкой «в запас», т. е. повреждаемость в испытаниях будет превышать максимальную эксплуатационную. Такой подход к проверке

надежности технических изделий вполне обоснован и часто применяется на практике. Важно, что успешно проведенные таким образом испытания, как и испытания, удовлетворяющие условию (2), гарантируют надежность изделия по всем $N_э$ вариантам применения.

С другой стороны, при расчете режимов УСИ необходимо, чтобы величина превышения $\delta П_{ij} = П_{y\,ij} - \max\limits_{l} П_{э\,ijl}$, была ограничена сверху, что обусловлено недопустимостью разрушения элементов в процессе испытаний, поскольку, в противном случае, по результатам неудачно проведенных испытаний (например, ввиду их чрезмерной перегрузки) будет принято ложное заключение о ненадежности изделия:

$$\begin{aligned} &П_{э\,ij} \le П_{\bullet pij} = \varepsilon_{ij}^{-1} a_{ij} \vee \delta П_{ij} = \\ &= (П_{y\,ij} - \max_{l} П_{э\,ijl}) \le (П_{пр\,ij} - \max_{l} П_{э\,ijl}), \end{aligned} \qquad (4)$$

где $П_{пр\ ij}$ – предельно допустимый в УСИ расход ресурса i-го элемента изделия с учетом j-ой характеристики ресурса; a – значение параметра ресурса $П$, при котором элемент изделия разрушается или наступает его параметрический отказ; ε – коэффициент запаса, назначаемый с учетом естественного рассеивания факторов, влияющих на расходуемый ресурс, и учитывающий влияние неучтенных факторов.

С учетом (3) и (4) область выбора режимов и объема УСИ примет вид двусторонних ограничений:

$$\max_{l} П_{э\,ijl} \le П_{y\,ij} \le П_{пр\,ij}. \qquad (5)$$

Поскольку $n \wedge m >> 1$ и $s << n \wedge m$, то выполнение на практике условия (5) сложно, поэтому можно только стремиться к выполнению этого условия, т.е. проводить выбор режимов и объема УСИ из условия:

$$\varphi_1 = Вер\{\max_{l} П_{э\,ijl} \le П_{y\,ij} \le П_{пр\,ij}\} = \frac{n^* \cup m^*}{n \cup m} \to 1, \qquad (6)$$

где n^* и m^* – число элементов и характеристик ресурса изделия, для которых выполняется условие (5).

Очевидно, что чем больше число элементов изделия, для которых выполняется принцип гарантированной проверки надежности в виде (5), тем эффективнее УСИ. Экстремальное значение φ_1 соответствует случаю, когда $n = n^*$ и $m = m^*$, при этом $\varphi_1 = 1$. Поскольку показатель φ_1, учитывает многовариантность применения изделия в эксплуатации, то, следовательно, его можно рассматривать в качестве критерия эффективности УСИ.

Критерий дифференцированного «зачета» эксплуатационных вариантов применения в ускоренных совмещенных испытаниях

Очевидно, что в интервале $1...N_э$ всегда существуют изделия, эксплуатируемые по менее нагруженным вариантам применения (например, авиационного ГТД, используемый в наземном варианте), в которых накапливается меньшая повреждаемость. В этом плане может оказаться целесообразным проведение дифференцированного «зачета» в УСИ 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 УСИ, 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 УСИ.

В этом случае длительность испытаний, соответствующая «зачету» в УСИ v-го эксплуатационного варианта, определится из условия:

$$\begin{aligned} &П_{yijv} = F(P_o, R_y, \tau_{з\,ijv}) = \\ &= П_{э\,ijv},\ \tau_{з\,ijv} = f(P_0, П_{э\,ijv}, R_y), \\ &P_0 = \text{idem};\ i = \overline{1,n};\ \ j = \overline{1,m};\ \ l = \overline{1,N_э}. \end{aligned} \qquad (7)$$

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

$$\tau_з = \max_{v} \tau_{з\,ijv}. \qquad (8)$$

При этом для ряда элементов изделия повреждаемость будет превышать их эксплуатационную в v-ом варианте применения (рис. 1), что может привести к искажению результатов проверки надежности как самих элементов, так и элементов, на надежность которых они оказывают влияние (например, отказ маслонасоса приводит к разрушению подшипниковых опор ротора по причине их масляного голодания и т.д.).

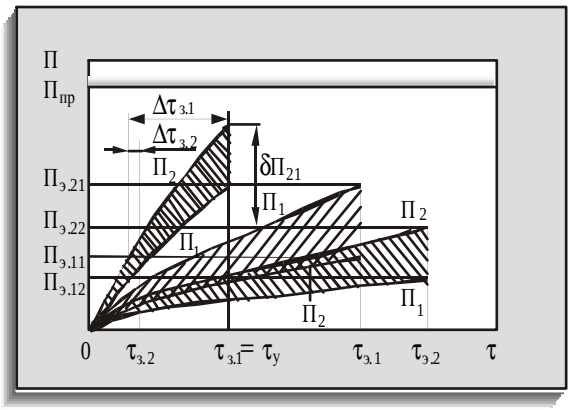

Рис. 1. Графическая иллюстрация дифференцированного «зачета» в УСИ эксплуатационных вариантов применения изделия для случая n = 2 и $N_э$ = 2:
$П_{э.i.v}$ – эксплуатационная повреждаемость i-го элемента в v-ом варианте; $\tau_{э.v}$ – длительность эксплуатации изделия в v-ом варианте; $\tau_у$ – длительность УСИ; $\tau_{з.v}$ – время «зачета» v-го варианта в УСИ; $\Delta\tau_{з.v}$ – интервал времени «зачета» v-го варианта; $\delta П_{iv}$ – «невязка» между повреждаемостью i-го элемента в эксплуатации и в УСИ (за время $\tau_{з.e}$)

Поэтому выбор параметров УСИ необходимо проводить минимизируя «невязки» между повреждаемостью, накопленной элементами за время $\tau_{y\,ijv}$, и повреждаемостью, в v-ом эксплуатационном варианте применения:

$$\left| П_{y\,ijv} - П_{э\,ijv} \right| \to \min . \qquad (9)$$

Для изделия в целом критерий дифференцированного «зачета» в УСИ эксплуатационных вариантов применения можно представить в виде:

$$\varphi_2 = \sum_{v=1}^{N_э} \Delta\tau_{з\,v} \to \min, \qquad (10)$$

где $\Delta\tau_{з\,v}$ – интервал «зачета» в УСИ v-го эксплуатационного варианта применения, определяемый по формуле:

$$\Delta\tau_{з\,ijv} = (\max_{ij} \tau_{з\,ijv} - \min_{ij} \tau_{з\,ijv}) . \qquad (11)$$

Из (10) следует, что экстремальное значение критерия φ_2 соответствует случаю, когда все элементы изделия «засчитываются» в УСИ в один момент времени: $\Delta\tau_{з\,1} = 0$, $\Delta\tau_{з\,2} = 0, \ldots, \Delta\tau_{з\,N} = 0$; $\varphi_2 = 0$.

Реализация принципа дифференцированного «зачета» в УСИ эксплуатационных вариантов применение позволяет повысить эффективность ускоренных испытаний за счет уменьшения числа необоснованно бракуемых вариантов применения изделия.

Показатели объема и длительности ускоренных совмещенных испытаний

Объем и длительность также характеризуют эффективность УСИ и поэтому могут рассматриваться в качестве самостоятельных критериев эффективности:

$$\varphi_3 = N_{CT} \sim N_y \to \min; \qquad (12)$$

$$\varphi_4 = \sum_{k=1}^{N_э} \tau_{y\,k} \to \min, \qquad (13)$$

где N_{CT}, N_y – соответственно число испытательных стендов и испытываемых изделий.

Совместная реализация условий (12) и (13) позволяет минимизировать материальные и временные затраты на проведение УСИ.

Область реализации режимов нагружения в ускоренных совмещенных испытаниях

При $N_э$ = 1 область реализации режима соответствует области эквивалентных испытаний G_R. При $N_э$ > 1 область реализации режима формируется объединением соответствующих эксплуатационных областей реализации режима $G_{R1}, \ldots, G_{Rv}$ ($v \in 1 \ldots N_э$):

$$R_{y\,\xi} = [R_1, R_2, \ldots, R_s] \in G_{R\,\xi}; \qquad G_{R\xi} = G_{R\,1} \cup G_{R\,2} \cup \ldots \cup G_{R\,vi}. \qquad (14)$$

Существование в УСИ одновременно N_y областей реализации режима ($G_{R\,1}$,. $G_{R\,2}, \ldots, G_{R\,Ny}$) 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 УСИ. Например, если из $N_э$ вариантов применения изделия в эксплуатации в N_1 случаях прогнозируется один вид разрушения, а в остальных N_2 вариантах – другой вид, то УСИ реализуются, по крайней мере, на двух изделиях: на одном – в зачет N_1 вариантов, на другом – N_2 вариантов ($N_1 + N_2 = N_э$) применения и т.д.

Взаимовлияние критериев эффективности

Взаимовлияние критериев эффективности φ_1, φ_2, φ_3 и φ_4 неоднозначно. Так, оптимизация УСИ по критерию φ_3 (означающее уменьшение объема испытаний) и φ_4 (означающее уменьшение длительности испытаний) приводит к снижению эффективности УСИ по критерию φ_1.

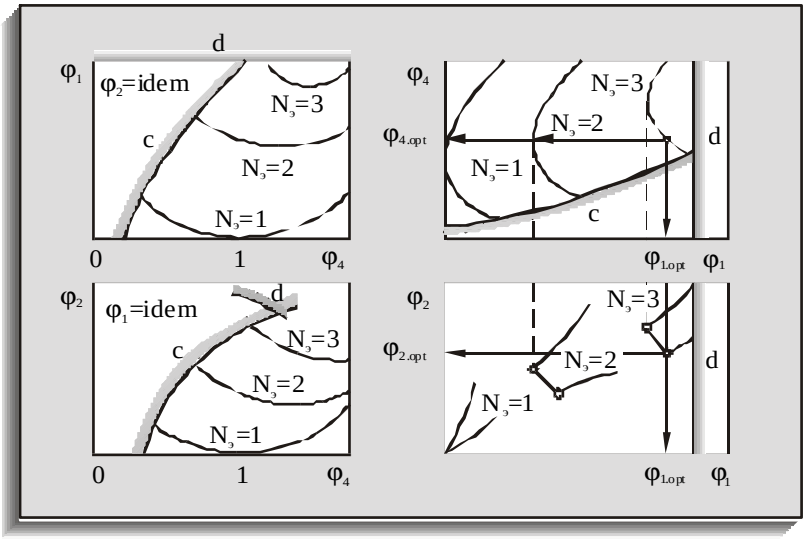

Рис. 2. Графическая иллюстрация взаимовлияния критериев эффективности φ_1, φ_2, φ_3 и φ_4 для случая трех эксплуатационных вариантов применения изделия:

– граница области реализации критерия; $\varphi_{1.opt}$ – оптимальное компромиссное решение

Одновременно с этим снижается эффективность УСИ по критерию φ_2, поскольку, ввиду рассогласования скоростей расходования ресурса элементов изделия по причине изменения режима испытаний, увеличиваются «невязки» $\Delta\tau_{зv}$ в формуле (10).

Анализ взаимовлияния критериев φ_1 и φ_2 показывает, что они также противоречивы друг другу и стремление удовлетворить одно временно их требованиям приводит к снижению эффективности УСИ (рис. 2).

Поэтому однозначное решение, которое бы удовлетворяло одновременно всем критериям эффективности, невозможно и выбор окончательного варианта УСИ является компромиссным.

Рассмотренные выше критерии φ_1, φ_2, φ_3 и φ_4 характеризуют основные требования, предъявляемые к УСИ, и, следовательно, образуют полную группу критериев, с учетом которой следует проводить выбор оптимальных режимов и объема УСИ.

SUBSTANTIATION OF PERFORMANCE CRITERIA OF ACCELERATED TESTS

© 2006 S.M. Minigaleev

USATU

Method of choice of parameters (volume, modes and duration) accelerated tests for engine of multialternative application is considered.

Authors have offered criteria of efficiency of accelerated tests of engines φ_1, φ_2, φ_3 and φ_4.