

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЛЕТОВ СВОБОДНОЛЕТАЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ МОДЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ И СРОКОВ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Летные исследования на свободнолетающих динамически подобных моделях (СДПМ) критических режимов полета самолетов – один из наиболее сложных методов экспериментальной аэродинамики, требующий привлечения авиационных специалистов высокой квалификации и использования обширного перечня специального оборудования. Однако осуществление аналогичных работ на натурных летательных аппаратах (ЛА) характеризуется еще большими сложностями: риском для жизни летчиков-испытателей, затратами времени и средств на создание и эксплуатацию соответствующего научно-исследовательского комплекса для проведения летных испытаний единичных ЛА, вероятность потери которых достаточно велика.

В общем случае определение потребного количества полетов СДПМ, необходимых для выполнения отдельных позиций конкретной программы и всей программы летных исследований на СДПМ, является достаточно сложной и не всегда имеющей однозначное решение задачей. В то же время это количество непосредственно связано с количеством СДПМ и сроками проведения исследований, и, тем самым, влияет на планирование как опережающих и сопровождающих, так и последующих работ на СДПМ, проводимых в рамках создания натурального ЛА.

При решении указанной задачи должны быть приняты во внимание [1 – 3]:

а) методические особенности проведения летных исследований на СДПМ;

б) специфика целевого применения СДПМ, сложность и степень изученности моделируемых режимов полета, а также соответствующая им вероятность утраты модели в ходе летных исследований;

в) используемые для решения конкретных задач способы запуска СДПМ, ее вывода из аварийных ситуаций, торможения и мягкой посадки;

г) возможности производства, определяющие количество и периодичность изготовления СДПМ, а, следовательно, поступление их на испытания;

д) возможности научно-исследовательского комплекса для проведения летных исследований на СДПМ;

е) параметры, летные и исследовательские возможности СДПМ;

ж) планируемый объем экспериментов по программе летных исследований на СДПМ;

к) размеры финансирования данной программы.

Перечисленные факторы образуют трудноформализуемую систему связей, корректное разрешение которой возможно лишь при определенном упрощении и схематизации задачи, а также при использовании статистических данных и зависимостей. Это, в ряде случаев, позволяет получить решения в конечном виде.

Прежде чем приступить к конкретному рассмотрению вариантов схематизации, отметим следующее. Стоимость первых экспериментальных образцов самолетов очень высока, и в летных испытаниях натуральных ЛА участвует их ограниченное количество. Как правило, стоимость СДПМ несопоставимо меньше стоимости натурального ЛА, а потребное количество СДПМ может быть не очень большим. Поэтому не вызывает особых сомнений то, что организация, строящая натуральный ЛА, может построить (или заказать в специализированных организациях) достаточное количество СДПМ для выполнения конкретной программы летных исследований в заданное время [1, 4].

Рассмотрим два наиболее вероятных варианта проведения летных исследований на СДПМ:

1. Существующее количество СДПМ начинает исследовательские полеты одновременно.

2. СДПМ вступают в летные исследования с постоянным интервалом времени  $\Delta T_i$ .

*Существующее количество СДПМ начинает исследовательские полеты одновременно.* В этом варианте время, необходимое для выполнения всех исследовательских полетов по  $i$ -й программе, можно определить по формуле

$$T_i = m_{cpi} t_{cpi}^{подг}, \quad (1)$$

где  $m_{cpi}$  – среднее количество полетов, которое может совершить одна СДПМ за время  $T_i$ ;  $t_{cpi}^{подг}$  – среднее время подготовки СДПМ к полету (включающее в себя время как рабочих дней, так и дней вынужденного простоя).

Вместе с тем

$$m_{cpi} = \frac{m_i}{n_{pi}}, \quad (2)$$

где  $m_i$  – потребное количество полетов  $n_{pi}$  рабочих СДПМ.

Подставляя это выражение для  $m_{cpi}$  в формулу (1), получим

$$T_i = \frac{m_i}{n_{pi}} t_{cpi}^{подг}. \quad (3)$$

Потребное количество полетов  $n_{pi}$  рабочих СДПМ можно определить, используя следующее соотношение:

$$m_i = \frac{t_{Mi}}{t_{cpi}} = \frac{t_{Mi}}{c_{ei} t_{maxi}} = \frac{t_{Mi}}{c_{ei} (t_i^{пл} - \Delta t_i)}, \quad (4)$$

где  $t_{Mi}$  – необходимая суммарная продолжительность экспериментальных информационных участков полетов  $n_{pi}$  СДПМ;  $t_{cpi} = c_{ei} t_{maxi}$  – средняя продолжительность экспериментальных участков одного информационного полета СДПМ;  $c_{ei}$  – коэффициент использования полетного времени;  $t_{maxi} = t_i^{пл} - \Delta t_i$  – максимально возможная продолжительность экспериментальных участков одного полета СДПМ;  $t_i^{пл}$  – планируемое время одного полета СДПМ (с момента старта до момента выпуска парашюта);  $\Delta t_i$  – время, необходимое для приведения СДПМ после старта в состояние начала эксперимента.

Заменяя  $m_i$  в формуле (3) его выражением (4), получим

$$T_i = \frac{t_{Mi} t_{cpi}^{подг}}{n_{pi} c_{ei} (t_i^{пл} - \Delta t_i)}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) для определения  $m_i$  и  $T_i$  получены при условии, что аварии или выход из строя рабочих СДПМ не приводят к нарушению графика летных исследований и удлинению их сроков. На практике это условие выполняется не всегда.

Одним из путей выполнения графика летных исследований является (если возможно) использование запасных СДПМ, способных полностью заменить рабочие СДПМ. С учетом формул (1) – (3) количество запасных СДПМ в этом варианте проведения летных исследований

$$n_{zi} = \frac{m_i}{m_{cpi}^{пот}} = \frac{n_{pi} m_{cpi}}{m_{cpi}^{пот}} = \frac{n_{pi} T_i}{m_{cpi}^{пот} t_{cpi}^{подг}}, \quad (6)$$

где  $m_{cpi}^{пот}$  – среднее число исследовательских полетов одной СДПМ до ее безвозвратной потери.

СДПМ вступают в летные исследования с постоянным интервалом времени  $\Delta T_i$ . В этом, как и в предыдущем варианте, будем считать, что аварии или выход из строя рабочих СДПМ не приводят к нарушению графика летных исследований и удлинению их сроков.

За время  $T_i$  первая СДПМ может совершить  $m_1 = \frac{T_i}{t_{спi}^{подг}}$ , вторая –

$$m_2 = \frac{T_i - \Delta T_i}{t_{спi}^{подг}}, \quad n_{pi}\text{-я} - m_p = \frac{T_i - (n_{pi} - 1) \Delta T_i}{t_{спi}^{подг}} \text{ полетов.}$$

Суммарное же количество полетов, которое могут и должны совершить  $n_{pi}$  рабочих СДПМ за время  $T_i$ ,

$$m_i = m_1 + m_2 + \dots + m_p = \frac{T_i n_{pi} - \Delta T_i \sum_{k=1}^{n_{pi}} (k-1)}{t_{спi}^{подг}}. \quad (7)$$

Но члены суммы  $\sum_{k=1}^{n_{pi}} (k-1)$  образуют возрастающую арифметическую прогрессию. Так как первый член  $a_1 = 0$ , последний  $a_n = n_{pi} - 1$ , а количество членов  $n = n_{pi}$ , то [5]

$$\sum_{k=1}^{n_{pi}} (k-1) = \frac{(a_1 + a_n)n}{2} = \frac{(n_{pi} - 1)n_{pi}}{2}. \quad (8)$$

Тогда

$$m_i = \frac{n_{pi} \left( T_i - \Delta T_i \frac{n_{pi} - 1}{2} \right)}{t_{спi}^{подг}}. \quad (9)$$

Приравнивая правые части формул (4) и (9), получим соотношение

$$\frac{t_{Mi}}{c_{ви} (t_i^{пл} - \Delta t_i)} = \frac{n_{pi} \left( T_i - \Delta T_i \frac{n_{pi} - 1}{2} \right)}{t_{спi}^{подг}}, \quad (10)$$

разрешая которое относительно  $T_i$ , будем иметь

$$T_i = \frac{t_{Mi} t_{cpi}^{подг}}{n_{pi} c_{ei} (t_i^{пл} - \Delta t_i)} + \Delta T_i \frac{n_{pi} - 1}{2}. \quad (11)$$

Если существует возможность использования запасных СДПМ, то аварии или выход из строя рабочих СДПМ не приведут к нарушению графика летных исследований и удлинению их сроков. Количество запасных СДПМ, как и в предыдущем варианте проведения летных исследований, определяется соотношением (6), а, используя формулу (9) для  $m_j$ , получим

$$n_{3j} = \frac{m_j}{m_{cpi}^{пом}} = \frac{n_{pi} \left( T_i - \Delta T_i \frac{n_{pi} - 1}{2} \right)}{m_{cpi}^{пом} t_{cpi}^{подг}}. \quad (12)$$

В формулы для определения  $m_j$ ,  $T_j$  и  $n_{3j}$  входят как параметры  $n_{pi}$ ,  $\Delta T_i$ ,  $t_{cpi}^{подг}$ ,  $t_{Mi}$ ,  $t_i^{пл}$ ,  $\Delta t_i$ ,  $c_{ei}$  и  $m_{cpi}^{пом}$ , значения которых нами пока недостаточно конкретизированы.

Если количество рабочих СДПМ  $n_{pi}$  задают исходя из финансовых или иных возможностей заказчика, значение интервала времени  $\Delta T_i$  – исходя из возможностей производства, а значения  $t_i^{пл}$  и  $\Delta t_i$  определяют при проектировании (исходя из задач моделирования, закладываемых энергетических возможностей СДПМ и условий безопасности при проведении летных исследований), то значения остальных параметров могут быть заданы или определены лишь при условии использования статистических данных о летных исследованиях на СДПМ и летных испытаниях натуральных ЛА.

В качестве примера приведем данные реализации штопорной программы СДПМ самолета Су-27 и его модификаций при запуске с самолета-носителя Ту-16. Для этой программы и конкретно этих СДПМ искомые параметры имеют следующие значения:  $t_{cpi}^{подг} = 9,36$  дня;  $t_{Mi} = 10386$  с;  $t_i^{пл} = 120$  с;  $\Delta t_i = 8$  с;  $c_{ei} = 0,84$ ;  $m_{cpi}^{пом} = 20,2$  полета [2].

Используя приведенные значения параметров, необходимо иметь в виду, что программы, реализующие исследования на флаттер, боевые повреждения или другие специальные программы, имеют несколько

отличные значения параметров  $t_{срi}^{подэ}$ ;  $t_{Mi}$ ;  $t_i^{пл}$ ;  $\Delta t_i$ ;  $c_{эi}$ ;  $m_{срi}^{пом}$ . Однако можно сделать и некоторые обобщения. Так,  $t_{срi}^{подэ}$  находится в пределах 8...10 дней,  $t_i^{пл}$  – 2...15 мин,  $\Delta t_i$  – 8...12 с,  $c_{эi}$  – 0,82...0,86,  $m_{срi}^{пом}$  – 16...20 полетов в зависимости от группы решаемых задач, способа запуска и типа СДПМ [2].

Кроме того, возможны два основных способа определения необходимой суммарной продолжительности экспериментальных информационных участков полетов всех СДПМ  $t_{Mi}$ :

1) по статистическим данным о фактической суммарной продолжительности экспериментальных информационных участков полета СДПМ того же типа самолетов, что и моделируемый ЛА;

2) по статистическим данным о фактической суммарной продолжительности экспериментальных информационных участков полета самолетов того же типа, что и моделируемый ЛА.

Ограничение для обоих способов: моделируемый натуральный ЛА и самолет-аналог должны быть одного типа. Поэтому для целей выполняемых расчетов можно принять

$$t_{Hi}^{нов} = t_{Hi}^{баз}, \quad (13)$$

где  $t_{Hi}^{нов}$ ,  $t_{Hi}^{баз}$  – новая и базовая суммарные продолжительности экспериментальных информационных участков полета моделируемого натурального ЛА и самолета-аналога.

При удовлетворении любой из возможных комбинаций критериев подобия при моделировании динамики полета в диапазоне высот полета натурального ЛА и СДПМ от 0 до 50000 м [6]

$$t_{Hi} = t_{Mi} \sqrt{k_\ell}, \quad (14)$$

где  $k_\ell = \frac{\ell_H}{\ell_M}$  – масштаб линейных размеров;  $\ell_H$ ,  $\ell_M$  – произвольно

выбранные сходственные номинальные (например, характерные) размеры натурального ЛА и СДПМ.

Поэтому при решении аналогичных задач моделирования

$$t_{Hi}^{баз} = t_{Mi}^{баз} \sqrt{k_\ell^{баз}}; \quad (15)$$

$$t_{Hi}^{нов} = t_{Mi}^{нов} \sqrt{k_\ell^{нов}}, \quad (16)$$

где  $t_{Mi}^{баз}$ ,  $t_{Mi}^{нов}$  – базовая и новая суммарные продолжительности экспериментальных информационных участков полета базовой и новой СДПМ;  $k_{\ell}^{баз}$ ,  $k_{\ell}^{нов}$  – новый и базовый масштабы линейных размеров.

Учитывая равенство (13) при совместном рассмотрении соотношений (15) и (16), получим

$$t_{Mi}^{нов} = t_{Mi}^{баз} \sqrt{\frac{k_{\ell}^{баз}}{k_{\ell}^{нов}}}. \quad (17)$$

Таким образом, получена зависимость для определения  $t_{Mi}$  при наличии статистических данных о базовой СДПМ.

Если же существуют данные лишь по самолету-аналогу, то  $t_{Mi}$  можно найти по преобразованной формуле (17) в виде

$$t_{Mi}^{нов} = \frac{t_{Hi}^{баз}}{\sqrt{k_{\ell}^{нов}}}. \quad (18)$$

При задании  $t_{Hi}^{баз}$  необходим всесторонний анализ выполняемых на натурном ЛА маневров, их дублирование, а также оценка необходимости повторения всех маневров на СДПМ в полном объеме. Это связано с отличающимися подходами к проведению определенной части летных испытаний натурального ЛА и летных исследований на СДПМ. Так, например, для самолетов используют принцип постепенного усложнения испытаний, что совсем не обязательно для СДПМ и может привести к заметному сокращению программы летных исследований на них [1, 4].

Для приближенного количественного анализа приведем следующие данные.

Штормовые режимы самолета Aero L-39 с регистрацией параметров исследовались с конца июля до середины ноября 1970 г. За 16 полетов было выполнено 78 вводов в шторм (обычный в три витка, при крайних положениях центровок, повышенных оборотах двигателя, с использованием закрылков, противштормового парашюта, с уменьшенным ходом рулей, с использованием интерцепторов и сваливанием на хвост) [7].

При исследовании управляемости на больших углах атаки, сваливания, шторма и вывода из последнего, а также сопротивляемости выходу на указанные критические режимы полета самолета Grumman F-14 было осуществлено 54 полета. В соответствии с программой выполнено 360 маневров, при этом преобладающее число

более ранних уходов с режимов (62 случая) было связано с ухудшением работы воздухозаборников, приводящим к срыву в двигателе. Необходимо отметить, что ни один маневр, ни одно перемещение рычага управления не выполнялись в полете, если их действие не было предварительно проверено численным моделированием и на стенде. Все это способствовало сокращению предполагаемого объема полетов как по причине невозможности реализовать некоторые режимы из-за имеющихся ограничений, так и по причине их выясненной бесполезности с точки зрения получения новых данных [8].

Штопорная программа самолета McDonnell Douglas F-18 из 16 полетов была ограничена испытаниями только в конфигурации истребителя сопровождения (с вооружением из двух ракет "Sidewinder" на концах крыла и двух ракет "Sparrow" на подфюзеляжных узлах) и включала в себя 113 вводов самолета в штопор. Перевернутый штопор не изучался. Во время испытаний были выявлены три вида нормального штопора: с малой угловой скоростью рысканья, со средней угловой скоростью и плоский штопор с большой угловой скоростью рысканья. Независимо от вида штопора выход из него осуществлялся менее чем за три витка [9].

Во всех рассмотренных примерах была осуществлена штопорная программа. Прямой пересчет приведенных данных позволяет получить ориентировочные значения  $t_{Hi}^{баз}$ . Так, для самолета L-39  $t_{Hi}^{баз} = 9360$  с, для самолета F-14  $t_{Hi}^{баз} = 13560$  с, а для самолета F-18  $t_{Hi}^{баз} = 17890$  с.

При использовании этих значений для планирования летных исследований на СДПМ самолета Су-27 в масштабе линейных размеров  $K_\ell = 5,5$  (в таком же масштабе построены и реальные СДПМ этого самолета) в соответствии с формулой (18) ряд возможных значений  $t_{Mi}^{НОВ}$ : 3991 с; 5782 с; 7628 с.

Конечно, эти значения отличаются от фактических значений  $t_{Mi}$  (10386 с) СДПМ самолета Су-27. Но, если учесть, что на самолетах L-39, F-14 и F-18 в данной части программы летных исследований перевернутый штопор не изучался (на самолете Су-27 такой вид штопора возможен и исследовался на его СДПМ), а также что L-39 и Су-27 – самолеты разных категорий, то два последних значения  $t_{Mi}^{НОВ}$  из приведенного ряда могли бы быть с успехом использованы.

На практике, конечно, возможны отклонения от принятого варианта проведения летных исследований на СДПМ, что обусловлено целым рядом причин, в первую очередь, связанных со сдвижкой в сроках поставки СДПМ, изменением времени подготовки СДПМ и научно-исследовательского комплекса к полетам из-за отказов техники, а также



причин, связанных с вынужденными простоями по погодным и другим непредсказуемым условиям. Принятые же и расчетные значения параметров варианта летных исследований на СДПМ являются основой для планирования, контроля и управления ходом их выполнения.

#### Список использованных источников

1. Применение свободнолетающих моделей для исследования динамики полета: обзор по материалам иностранной печати за 1941–1970 гг. [Текст] // Обзоры. Переводы. Рефераты. Вып. 352. – М. : ЦАГИ, 1971. – 92 с.

2. Бетин, А.В. Принципы определения потребного числа полетов и необходимого количества свободнолетающих моделей для выполнения заданной программы летных исследований [Текст] / А.В. Бетин // Рукопись деп. в ГНТБ Украины 12.08.96, N 1631-Ук 96. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1996. – 17 с.

3. Бетин, А.В. Теоретические основы планирования при реализации технологии опережающих исследований на свободнолетающих моделях [Текст] / А.В. Бетин, А.И. Рыженко, М.Н. Мурин // Материалы шестой междунар. конф. “Новые технологии в машиностроении”. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1997. – С. 165–170.

4. Летные исследования и испытания: Фрагменты истории и современное состояние [Текст] // Науч.-техн. сборник. – М. : Машиностроение, 1993. – 496 с.

5. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 852 с.

6. Бетин, А.В. Критерии подобия при изучении динамики полета [Текст] / А.В. Бетин // Проблемы проектирования летающих моделей для исследования критических режимов полета: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. – Х., 1989. – С. 78 – 89.

7. Kucera, P. Aero L-39 Albatros [Текст] / P. Kucera. – Praha: Nase Vojsko, 1988. – Stran. 64.

8. Результаты летных испытаний самолета F-14 с опытной системой управления на больших углах атаки [Текст] // Техническая информация, N 5. – М. : ЦАГИ, 1984. – С.7–22.

9. Испытания самолета Макдонелл-Дуглас F-18 на больших углах атаки [Текст] // Техническая информация, N 6. – М. : ЦАГИ, 1984. – С.1–8.

*Поступила в редакцию 08.12.2014*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Рыженко,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*