

УДК 629.78.015

В.М.Б е л о к о н о в

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА
И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ

Основной задачей функционирования летательных аппаратов является осуществление полета, при котором оптимальным способом выполняются запланированные целевые операции. Поэтому проектирование полета или оптимального движения ЛА занимает верхний уровень в иерархии сложных систем проектирования, который определяет облик ЛА.

Улучшение качества проектирования движения ЛА, необходимость повышения надежности выполнения целевых задач полета требуют углубления, увеличения объема и автоматизации параметрических исследований динамики полета на ранних стадиях проектирования.

Полет ЛА на интервале времени $t_0 \leq t \leq t_x$ описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{y} = f(t, y, u, a, e) \quad (1)$$

с начальными условиями $y(t_0) = y_0$, $e(t_0) = e_0$ и уравнениями связи между переменными

$$y(y, u, a, e) = 0, \quad (2)$$

где

$y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ - вектор фазовых координат объекта;

$f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ - вектор-функция правых частей;

$u = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ - вектор управлений, $u \in U^r$;

$a = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ - постоянный вектор проектных параметров ЛА $a \in A^k$

$e = \{e_1, e_2, \dots, e_s\}$ - вектор воздействий внешних условий полета, компоненты которого могут быть случайными параметрами или случайными функциями.

При проектировании оптимального движения ЛА техническими требованиями устанавливается некоторый набор летно-технических характеристик движения — функционалов, совокупность которых образует $(m+1)$ -мерный вектор $\varphi [y(t), u(t), a, e]$. Эти характеристики назовем контролируемыми (выходными) параметрами движения. В качестве выходных параметров могут быть использованы как интегралы уравнений движения (I), так и некоторые показатели движения в характерные моменты времени.

Наиболее важный контролируемый параметр φ_0 примем при оптимизации за критерий качества движения. На остальные контролируемые параметры движения техническими требованиями накладываются ограничения

$$\varphi_i [y(t), u(t), a, e] \leq \varphi_i^*; \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Все параметры, включенные в описание математической модели (I), (2) и влияющие на контролируемые характеристики движения, являются входными параметрами. Те из них, которые варьируются в процессе проектирования или эксплуатации, назовем управляющими (проектными) параметрами. Остальные входные параметры либо зафиксированы, либо являются возмущающими воздействиями, от полноты учета которых зависит степень точности описания процесса движения.

Для большинства задач динамики полета зависимости контролируемых параметров движения от входных параметров определяются в результате численного интегрирования системы (I)

Нелинейные дифференциальные уравнения движения (I) и принятые численные методы их интегрирования составляют основную математическую модель движения ЛА. Модель гравитационного поля, атмосферы, аэродинамических характеристик и внешних характеристик двигательной установки являются исходными (заданными) характеристиками математической модели. Совокупность основной математической модели и ее исходных характеристик образуют математическую модель движения [I].

Процесс получения контролируемых параметров движения на основе применения математической модели с помощью ЭЦВМ при фиксированных значениях векторов проектных параметров, параметров закона управления и внешних условий назовем численным или машинным экспериментом (машинный эксперимент будем рассматривать в качестве основного оператора при параметрических исследованиях).

Численный (машинный) эксперимент может быть многократно повторен на ЭЦВМ при любых сочетаниях параметров ЛА, его системы управ-

ления и других входных воздействий и является удобным инструментом параметрических исследований.

Понятием "параметрические исследования" объединим следующие основные задачи динамики полета, которые обычно решаются в ходе проектирования.

Задачи параметрического анализа:

определение параметрического математического описания (параметрическая идентификация), выражающего приближенную аналитическую зависимость контролируемых характеристик движения от входных параметров (задача сводится к многократному выполнению машинных экспериментов по определенному плану, выбираемому по теории планирования экспериментов);

определение вероятностных характеристик контролируемых параметров при заданных законах распределения всех входных параметров, в том числе проектных и неуправляемых параметров (задача решается одним из методов статистического анализа).

Задачи параметрического синтеза:

определение оптимальных вектора проектных параметров и закона управления, обеспечивающих экстремум критерию качества \mathcal{J}_0 при детерминированных значениях остальных входных параметров;

определение допусков на отклонения проектных параметров от номинальных значений при допустимых отклонениях контролируемых параметров.

На различных этапах параметрических исследований движения ЛА целесообразно использовать соответствующие уровни математических моделей. В зависимости от степени детализации, принятых допущений и точности математического описания всех сторон процесса движения ЛА можно выделить три основных уровня математических моделей: приближенная детерминированная, имитационная детерминированная и имитационная стохастическая модели.

Приближенную детерминированную модель целесообразно применять при предварительном синтезе оптимальных проектных параметров, при быстром получении грубых оценок влияния как параметров ЛА, так и начальных условий движения на контролируемые параметры. В процессе проектирования ЛА используется широкий спектр приближенных моделей, отличающихся друг от друга количеством и глубиной вводимых допущений. Оптимальной следует принять такую приближенную модель, когда при сохранении достаточной точности описания процесса полета удается получить аналитическое, например, асимптотическое решение или значительно ускорить получение численного результата.

Имитационные математические модели представляют собой формализованное описание процесса полета во всей его полноте на грани современного научного значения. В детерминированной имитационной модели полета все параметры и функции, определяющие исходные характеристики модели движения являются точно известными величинами. Детерминированная имитационная модель применяется на этапах уточненного параметрического анализа и синтеза, для проверки и отработки в эскизном и рабочем проекте вариантов проектных параметров и начальных условий движения.

В отличие от детерминированной в стохастической имитационной модели все или часть параметров и функций, определяющих исходные характеристики модели, являются случайными величинами и соответственно, случайными функциями. Стохастическая имитационная модель наиболее адекватно соответствует реальному процессу движения ЛА и отражает объективно существующий фактор неполного знания и неточности воспроизведения исходных характеристик математической модели. Стохастическая модель используется на заключительных этапах параметрических исследований при оценке точности выполнения целевых задач полета и при определении допусков на параметры ЛА и закона управления.

Преимуществом имитационных математических моделей, делающим их пригодными в системах автоматического исследования, является универсальность применения для разнообразных задач движения ЛА поскольку их основной является система дифференциальных уравнений в общем виде.

Следует отметить характерные особенности параметрических исследований динамики полета ЛА в процессе проектирования.

Первой особенностью является необходимость учета большого числа параметров ЛА и его системы управления, делающего очень громоздкими параметрические исследования для достаточно точных математических моделей движения.

Другой особенностью является недостаточный уровень априорной информации при создании новых образцов изделий, несмотря на определенное число аналитических или численных решений, которые выполнялись при весьма больших упрощениях математических моделей. При этой недостаточности априорной информации всю необходимую при параметрических исследованиях информацию приходится запрашивать, получать, запоминать и обрабатывать в процессе решения задачи.

Наконец, третьей особенностью этого класса задач является трудность или невозможность экспериментальной проверки результатов тео-

ретических исследований на стадии проектирования. Поскольку при проектировании новых изделий натурный эксперимент заменяется имитационным численным, для проверки принятых решений или изменений параметров требуется проводить детальные многопараметрические исследования.

Эти особенности делают актуальной постановку задачи обобщения и автоматизации параметрических исследований динамики полета в единую систему: параметрический анализ и идентификация, синтез оптимальных параметров, анализ надежности выполнения целевых задач. Указанная система может быть включена в общую систему автоматического проектирования изделия.

С ростом быстродействия ЭЦВМ, совершенствованием систем программирования и созданием необходимого фонда алгоритмов и программ при анализе и синтезе нелинейных динамических процессов полета ЛА становится возможным использование не только приближенных, но и имитационных математических моделей движения и создания на их основе автоматизированных имитационных систем исследования.

Имитационная система автоматизированного исследования динамики полета имеет все признаки сложной системы в том числе и иерархическую структуру.

Рассмотрим имитационную систему автоматизированного параметрического синтеза и анализа динамики полета как двухуровневую многоцелевую систему [2]. Блок-схема такой системы представлена на рис. 1.

Управляемым рабочим процессом системы является процесс движения ЛА в атмосфере, который описывается математической моделью. Для решения различных задач параметрического анализа и синтеза может быть использован один из трех уровней математической модели. Например, для предварительного синтеза оптимальных проектных параметров целесообразно применить приближенную детерминированную модель. В то же время при оценке эффективности выполнения целевых задач необходимо использовать имитационную стохастическую модель.

Первым, низшим уровнем двухуровневой имитационной системы автоматизированных исследований являются решающие блоки основных задач параметрических исследований.

В блоке анализа и параметрической идентификации предусматривается возможность решения следующих задач:

1. Выполнение пробного или поверочного анализа, при котором осуществляется единичный численный эксперимент, на имитационной математической модели для фиксированной точки проектных и остальных

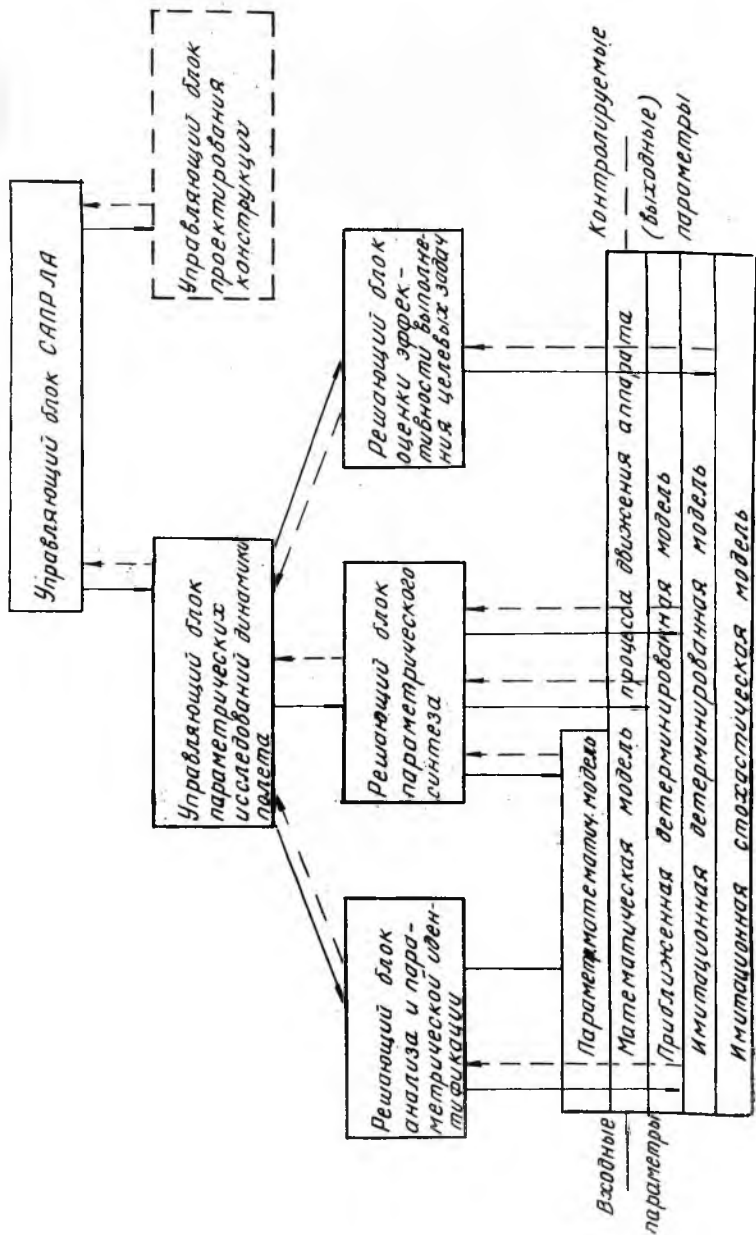


Рис. I

входных параметров. Результатом анализа, который запоминается или передается в управляющий блок, является получение всех контролируемых (выходных) параметров движения.

2. Параметрическая идентификация контролируемых характеристик движения в малой окрестности фиксированной точки входных параметров (локальная параметрическая идентификация). При этом строятся симплекс – планы или симплекс – суммируемые планы, производятся вычисления контролируемых параметров в точках соответствующего плана с помощью имитационной математической модели, по методу наименьших квадратов находятся аппроксимационная или регрессионная (линейная, квадратичная) модели.

Результаты локальной параметрической идентификации запоминаются и могут быть использованы как упрощенные системы при определении вероятностных характеристик и для определения производных в градиентных методах блока выбора оптимальных параметров.

3. Параметрическая идентификация в конечной допустимой области задания входных параметров (глобальная параметрическая идентификация). Осуществляется выбор класса ортогональных функций, соответствующего рассматриваемому виду движения ЛА, выполняется планирование численного эксперимента на имитационной математической модели, строятся аппроксимационные или регрессионные модели контролируемых параметров. Результаты глобальной параметрической идентификации используются в качестве приближенных аналитических зависимостей контролируемых параметров движения от проектных параметров ЛА, а также как приближенные математические модели при оптимизации параметров.

В блоке параметрического синтеза оптимального движения ЛА осуществляется выбор метода оптимизации проектных параметров ЛА и параметров закона управления из имеющегося набора методов нелинейного программирования. Выбранный метод оптимизации образует управляющую программу процесса оптимизации, включающую в себя в качестве процедуры определение контролируемых характеристик движения. Для выбора оптимальных параметров в первом приближении процедура определения контролируемых параметров может использовать приближенную модель, полученную в подблоке глобальной параметрической идентификации, или приближенную исходную математическую модель (I). Для уточненного определения оптимальных проектных параметров контролируемые (выходные) параметры вычисляются по имитационной детерминированной математической модели движения.

Найденные в результате процесса поиска оптимальные проектные параметры ЛА и параметры закона управления принимаются за номинальные параметры, которые используются в блоке оценки вероятностных характеристик и определения допусков, а также в других подсистемах системы автоматизированного проектирования изделия.

В блоке оценки эффективности выполнения целевых задач полета предусмотрена возможность решения двух завершающих задач параметрических исследований:

1. Определение оценок вероятностных характеристик контролируемых параметров движения в окрестности номинальных значений входных параметров методом коррелированных процессов [3], [4]. Для построения модели упрощенной системы используется обращение к подблоку локальной параметрической идентификации. Формируются массивы результатов статистических испытаний упрощенной и исходной систем, на основании которых определяются статистические значения вероятностных характеристик упрощенной и исходной систем. По известным точным значениям вероятностных характеристик и их статистическим значениям для упрощенной системы и статистическим значениям вероятностных характеристик для исходной системы, вычисляются исходные оценки вероятностных характеристик контролируемых параметров движения.

2. Определение максимальных допусков на отклонение проектных параметров от их номинальных значений, при которых контролируемые параметры движения не выходят из допустимых пределов с заданной вероятностью, что гарантирует успешное выполнение целей полета.

Верхним уровнем рассматриваемой системы является управляющий блок, который определяет очередность выполнения задач параметрического анализа и синтеза, окончание решения каждой из задач, использование результатов решенной задачи при исследовании других и т.п.

В блоке должны быть предусмотрены возможности получения любых промежуточных результатов, внесения коррективы в принятые системой решения, выполнения изолированных решений отдельных задач по заданиям проектанта.

Управляющий блок параметрических исследований динамики полета может иметь связи через управляющие блоки более высокого уровня и с другими подсистемами общей системы проектирования летательного аппарата, например, с блоком проектирования конструкции.

Использование рассмотренной системы позволит ускорить процесс проектирования и улучшить качество принимаемых проектных решений на ранних стадиях проектирования ЛА.