

12. Апарцин А.С., Спиряев В.А. Об одном подходе к идентификации полиномов Вольтерра // Оптимизация, управление, интеллект. – 2005. – № 2(10). – С. 109–117.
 13. MAPLE 10 // Licensed to: Energy Systems Institute of the SB RAS. Serial number: 5GG8Z57RMT8DA5ZE.

В.В.Суржик

Моделирование динамики экранопланов

Проектирование экранопланов какой либо компоновочной схемы существенно отличается от создания самолетов такого же взлетного веса. Эти отличия связаны не столько с конструктивными особенностями, а с особыми свойствами околоэкранный эродинамики. При движении несущей поверхности (крыла) над экранирующей поверхностью (над землей, водой, льдом, снегом и т.д.) растет его подъемная сила и уменьшается сопротивление. Кроме этого, при изменении высоты крыла над экраном, существенно меняются и его динамические характеристики. В частности, кроме аэродинамического фокуса на крыле появляется экранный фокус, положение которого зависит от высоты положения крыла над экранирующей поверхностью или от отстояния крыла. Расположение этих фокусов аэродинамического и экранного в конкретной компоновочной схеме и определяет динамические свойства и устойчивость экраноплана. При изменении высоты крыла над экраном, эти виртуальные точки меняют свое место приложения, а при колебании экраноплана вокруг положения равновесия при воздействии внешнего возмущения происходит так называемая "пляска" фокусов. Эта пляска фокусов есть изменение взаимного местоположения аэродинамического и экранного фокусов в конкретной компоновочной схеме. Она и определяет устойчивость экраноплана.

Определение суммарного аэродинамического и экранного фокусов компоновочной схемы экраноплана является сложной задачей и всецело зависит от того с какой степенью достоверности составлена математическая модель движения экраноплана и какие при этом приняты допущения.

Для крыла, движущегося над экраном, и находящегося на некотором расстоянии от центра тяжести (ЦТ) схемы, функциональная зависимость его аэродинамического коэффициента подъемной силы представим в виде:

$$C_{y_i} = C_{y_i}^{\alpha} \alpha_{o_i} + C_{y_i}^{\alpha} \Delta \alpha_i + C_{y_i}^{\bar{h}} \Delta \bar{h}_i \pm C_{y_i}^{\bar{h}} (\bar{x}_{T_i} \mp 1) \Delta \vartheta \pm C_{y_i}^{\alpha} (\bar{x}_{T_i} \pm \bar{x}_{F_{\alpha}}) \frac{\bar{b}_{A_i}}{\mu} \frac{d\vartheta}{dt}, \quad (1)$$

где $C_{y_i}^{\alpha} \alpha_{o_i}$ - стационарное значение коэффициента подъемной силы i -ого крыла;

$C_{y_i}^{\alpha} \Delta \alpha_i$ - изменение коэффициента подъемной силы i -ого крыла при изменении угла атаки на $\Delta \alpha_i$;

$C_{y_i}^{\bar{h}} \Delta \bar{h}_i$ - изменение коэффициента подъемной силы i -ого крыла при изменении его отстояния на $\Delta \bar{h}_i$;

$C_{y_i}^{\bar{h}} (\bar{x}_{T_i} \mp 1) \Delta \vartheta$ - изменение C_{y_i} при изменении угла тангажа на величину $\Delta \vartheta$;

$C_{y_i}^{\alpha} (\bar{x}_{T_i} \pm \bar{x}_{F_{\alpha}}) \frac{1}{\mu} \frac{d\vartheta}{dt}$ - изменение C_{y_i} при вращении экраноплана вокруг поперечной оси OZ_c связанной

системы координат с угловой скоростью $\frac{d\vartheta}{dt}$;

$\mu = \frac{2m}{\rho S_2 b_{A_i}}$ - относительная плотность компоновочной схемы экраноплана, $\bar{b}_{A_i}$ - средняя аэродинамическая

хорда крыла;

$\bar{x}_{T_i}$ - относительная координата носика профиля до ЦТ схемы;

$\bar{x}_{F_{\alpha}}$ - относительная координата аэродинамического фокуса крыла.

Функциональная зависимость коэффициента сопротивления крыла C_{x_i} на основании аналогичных соображений имеет вид:

$$C_{x_i} = C_{x_i}^{\alpha} \alpha_{o_i} + C_{x_i}^{\alpha} \Delta \alpha_i + C_{x_i}^{\bar{h}} \Delta \bar{h}_i \pm C_{x_i}^{\bar{h}} (\bar{x}_{T_i} \mp 1) \Delta \vartheta \pm C_{x_i}^{\alpha} (\bar{x}_{T_i} \pm \bar{x}_{F_{\alpha}}) \frac{\bar{b}_{A_i}}{\mu} \frac{d\vartheta}{dt} \quad (2)$$

Применив стандартную методику составления дифференциальных уравнений продольного движения из [1] для экранопланов, и, вводя в них выражения (1) и (2), мы получим однородную линеаризованную систему дифференциальных уравнений продольного движения экраноплана с постоянными коэффициентами [2].

Основанием для выделения из общей системы дифференциальных уравнений пространственного движения экраноплана уравнений продольного движения является его симметрия относительно продольной плоскости и как следствие этого симметрия обтекания при движении без крена и скольжения. Боковое же движение экраноплана нельзя рассматривать изолированно, так как параметры продольного движения входят в выражения для боковой силы и моментов относительно осей OX_c и OY_c связанной системы координат. Следовательно, если экраноплан движется с креном и скольжением, нужно рассматривать полную систему пространственного движения.

Важнейшим вопросом при создании экранопланов является вопрос обеспечения им необходимой устойчивости на всех режимах движения. По общему мнению, зарубежных аэродинамиков проблема устойчивости экранопланов относится к числу самых неизученных в экранопланостроении. С точки зрения оценки совершенства экраноплана в отношении его устойчивости и управляемости существенным является не только то, что экраноплан вернется или не вернется в исходный режим полета после действовавшего на него возмущения. Важно знать, как быстро произойдет это возвращение, насколько изменится движение экраноплана под влиянием определенного возмущения в первый момент времени, то есть заброс его параметров, и каков будет характер возмущенного движения. Таким образом, при изучении устойчивости экраноплана целесообразно рассматривать весь процесс возмущенного движения, а не только его конечный результат. Вопросам исследования устойчивости экранопланов и определению критериев устойчивости посвящено большое количество работ. Рассмотрим некоторые подходы к этому важному моменту в теории и практике экранопланостроения.

Существует два подхода к исследованию продольной статической устойчивости экранопланов. Один из них, основанный на методах начальной остойчивости, введен из теории корабля и заключается в использовании метациентрических формул остойчивости и понятий условной метациентрической высоты.

В работе [3] условная метациентрическая высота H определена, как

$$H = \frac{\Delta M_z}{\Delta \psi}, \quad (3)$$

где ΔM_z - суммарное приращение момента несущих элементов экраноплана при изменении его угла дифферента, $\Delta \psi$ - приращение угла дифферента.

В работах [4,5] А.Н. Панченков исследовал задачу оптимального проектирования ЛА путем набора параметров компоновочной схемы ЛА, обеспечивающих ему устойчивый полет на заданной высоте от поверхности земли. Эта задача решалась введением в рассмотрение локальных функционалов, из условия минимума которых определялся оптимальный вектор проектных параметров. При решении поставленной задачи было получено несколько критериев, обеспечивающих оптимальную стабилизацию ЛА. Другой метод исследования продольной устойчивости основан на традиционном в динамике самолета методе изучения устойчивости стационарного движения ЛА на базе свободного члена характеристического уравнения однородной линеаризованной системы дифференциальных уравнений продольного движения с постоянными коэффициентами.

Для экранопланов основным режимом движения является полет на заданной высоте с жесткими ограничениями на заброс параметров движения $\delta(\Delta \vartheta)$ и $\delta(\Delta \bar{H})$. Реализация такого режима возможна или путем оснащения экранопланов системами автоматической стабилизации или путем создания экранопланов самостабилизированных схем.

Под самостабилизацией подразумевается способность экраноплана сохранять балансировочные режимы и устойчивость движения без вмешательства органов управления во всем диапазоне полетных скоростей при действии широкого спектра эксплуатационных возмущений.

Другими словами, самостабилизированный экраноплан должен иметь несущий комплекс, обеспечивающий ему балансировку и устойчивость в диапазоне летных скоростей при любых эксплуатационных возмущениях без резких скачков $\delta(\Delta \vartheta)$ -угла тангажа и $\delta(\Delta \bar{H})$ -отстояния ЦТ от экрана.

В работе [6] Ю.В. Разумеенко предлагает ввести в практику исследования устойчивости скоростных судов термин «техническая устойчивость» (ТУ), впервые введенный Н.Д. Моисеевым. Под ТУ понимается способность объекта пребывать в наперед заданных допустимых отклонениях координат при действии на него возмущающих сил или начальных возмущений, не превосходящих заданных пределов. Проблемой ТУ занимались В.И. Зубов, А.М. Басин и Ю.Ф. Иванюта. Все предлагаемые меры ТУ по отношению к детерминированным возмущениям определенного класса носят частный характер и могут применяться для сравнения ТУ разных объектов, но только при действии на них одних и тех же конкретных видов возмущающих сил.

Наибольшее распространение при изучении устойчивости экранопланов получил метод, применяемый при изучении устойчивости ЛА в безграничной жидкости, когда пренебрегают изменением скорости объекта ($\Delta \bar{V} \equiv 0$). В этом случае первое уравнение, содержащее $\Delta \bar{V}$, превращается в тождество и система уравнений будет описывать короткопериодическое движение экраноплана. Так в работе [6] получены критериальные оценки короткопериодического движения экраноплана, в которых не учтены демпфирующие члены, возникающие при колебании экраноплана вокруг ЦТ:

$$\sigma_{\alpha}|_{\bar{H}=const} = \bar{X}_{CT} - \bar{X}_{F\alpha} = \frac{m_z^{\alpha}}{C_y^{\alpha}}, \quad \sigma_{\bar{H}}|_{\alpha=const} = \bar{X}_{CT} - \bar{X}_{F\bar{H}} = \frac{m_z^{\bar{H}}}{C_y^{\bar{H}}},$$

запас статической устойчивости по углу атаки при $\bar{H} = const$ и запас статической устойчивости по высоте над экраном при $\alpha = const$.

Из свободного члена характеристического уравнения критерий устойчивости экраноплана в [7] получен в виде

$$\bar{X}_{F\bar{H}} - \bar{X}_{F\alpha} < 0, \text{ или } \frac{m_z^{\alpha}}{C_y^{\alpha}} - \frac{m_z^{\bar{H}}}{C_y^{\bar{H}}} < 0.$$

Основной вывод данной работы заключается в том, что экраноплан компоновочной схемы «утка» будет аperiodически неустойчив, что не соответствует действительности.

В общем случае в задачах изучения свободной динамики экранопланов речь идет о создании такой компоновочной схемы и выборе таких параметров, которые обеспечили бы экраноплану заданную динамику. Основное отличие такой задачи от обычной задачи оптимального управления состоит в том, что в этом случае в качестве управляющего вектора $\bar{U}$ выступает вектор параметров той или иной компоновочной схемы – величина, явно не зависящая от времени t и вектора состояния $\bar{x}$ [8]. Решение подобных задач возможно или стохастическими методами [9] (то есть искать оптимальное решение на ансамбле реализаций случайного вектора $\bar{x} \in \bar{X}$), или, в случае линейного векторного дифференциального уравнения, эту задачу можно интерпретировать как задачу максимизации по модулю действительной части корня характеристического полинома.

Задача определения геометрических размерений самостабилизированного экраноплана компоновочной схемы «утка», обладающего устойчивыми режимами на всех высотах полета над экраном вплоть до полета в безграничной жидкости, приведена в патенте на изобретение [10]. Приведенный в патенте полином

$$\bar{S}_2 = (0,598417 + 0,59237 \times \bar{L}_2 + 0,138457 \times \bar{L}_2^2)^{-1} \quad (4)$$

связывает соотношение площадей крыльев $\bar{S}_2 = \frac{S_2}{S_1}$ с плечами центров давления крыльев до ЦТ $\bar{L}_2 = \frac{L_2}{L_1}$ и делит

область $\bar{S}_2 \sim \bar{L}_2$ на две части: область устойчивых значений $\bar{S}_2$ и $\bar{L}_2$ для экраноплана и область неустойчивых значений.

По мнению зарубежных исследователей проблема обеспечения необходимой эксплуатационной устойчивости полета экраноплана посредством подбора геометрических размерений компоновочной схемы является почти неразрешимой. Это мнение, по-видимому, объясняется с одной стороны необычайной сложностью проблемы, а с другой – теми неудачами, с которыми встречались зарубежные экранопланостроители, например, Д. Уорнер, И. Троенг, Ч. Вейланд, Ш. Эндо, Г. Йорг и другие.

Существующие экранопланы и экранолеты, например, экранолеты А. Липпиша, экранопланы и экранолеты ЦКБ по СПК Нижнего Новгорода и экранолеты В. Колганова, все выполнены по «самолетной» схеме и не обладают свойством самостабилизации. Этими экранопланами необходимо постоянно управлять, а управление на малых высотах обладает определенными трудностями, так как требует большой концентрации внимания при пилотировании. Эти экранопланы и экранолеты требуют установки на них систем автоматического управления. В работе [2] приведены критерии статической устойчивости для экранопланов различных компоночных схем. Для экранопланов схемы «утка» и ее модификаций этот критерий имеет вид

$$\frac{a_{42} + a_{43}}{a_{22} + a_{23}} - \frac{a_{45}}{a_{25}} > 0,$$

где a_{ij} коэффициенты матрицы A в $\frac{dx}{dt} = Ax$.

Или с учетом функциональной зависимости коэффициентов системы уравнений a_{ij} от геометрии компоновочной схемы и позиционных производных

$$\frac{m_z^\alpha + m_z^g}{C_y^\alpha + C_y^g} - \frac{m_z^H}{C_y^H} > 0, \text{ или } \Delta \bar{X}_F = \sigma_g|_{\bar{H}=\text{const}} - \sigma_H|_{g=\text{const}} > 0, \quad (5)$$

где $\Delta \bar{X}_F$ - разнос фокусов; $\sigma_g|_{\bar{H}=\text{const}}$ - запас статической устойчивости по тангажу; $\sigma_H|_{g=\text{const}}$ - запас статической устойчивости по отстоянию.

Полученное выражение для $\Delta \bar{X}_F$ является мерой технической или эксплуатационной устойчивости для экранопланов схемы «утка» и ее модификаций и он гарантирует отсутствие в характеристическом уравнении положительных действительных корней.

Потеря экранопланом колебательной или динамической устойчивости наступит, когда меняет знак с положительного на отрицательный детерминант Рауса-Гурвица

$$R_1 = P_1 P_2 P_3 - P_0 P_3^2 - P_1^2. \quad (6)$$

Следовательно, выражение R_1 есть мера колебательной устойчивости. Этот критерий гарантирует отсутствие положительных вещественных частей комплексных корней.

Критерии $\Delta \bar{X}_F$ и R_1 дают ответ устойчива система или нет, но не гарантируют безопасность экраноплана в реальном возмущенном движении на малых отстояниях из-за возможной встречи аппарата с экраном при наличии значительных забросов выходных величин $\delta(\Delta g)$ и $\delta(\Delta H)$. Поэтому оценку экраноплана на статическую и динамическую устойчивость с помощью критериев (5) и (6) следует вести на ранних этапах эскизного проектирования, а затем изучать весь переходный процесс возмущенного движения и конструировать такой аппарат, у которого забросы выходных параметров $\delta(\Delta g)$ и $\delta(\Delta H)$ стремились бы к нулю или были бы минимальными.

Заключение

- предложенные критериальные оценки статической устойчивости, являются мерой самостабилизации экранопланов схемы «утка» и ее модификаций;
- предложенная методика учета нестационарности изменения кинематических параметров в (1) и (2) позволяет учитывать нестационарность не усложняя исходную систему уравнений движения;
- результаты исследований патента [10] дают разработчикам экранопланов схемы «утка» механизм, позволяющий выбрать размерения устойчивого экраноплана на этапе предэскизного проектирования.

Библиографический список

1. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1965/ - 463 с.
2. Суржик В.В. Проблемы динамики экранопланов // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: Сб. научн. тр. - Иркутск: ИрГУПС, 2006.
3. Орлов Ю.Ф. К вопросу о статической устойчивости тел, движущихся вблизи жидкой или твердой поверхности // Асимптотические методы в механике. - Иркутск, 1979. - С.88-106.
4. Панченков А.Н. Некоторые вопросы оптимального проектирования гидродинамических несущих комплексов // Новосибирск: Наука, 1982. - С. 3-29.
5. Панченков А.Н. Энтропия. - Нижний Новгород: Изд-во общества "Интелсервис", 2002. - Т. 2. - 712 с.
6. Разумеев Ю.В. Основные категории и понятия технической теории устойчивости движения судов // Материалы Всесоюзного семинара по динамике корабля. - Л.: Судостроение, 1971. - № 169. - С.9-19.
7. Иродов Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана - М.: 1970. Ученые записки ЦАГИ. - Т.1. - № 3.
8. Суржик В.В. Некоторые подходы к решению задач оптимальной стабилизации летательных аппаратов, использующих влияние близости экрана. - Иркутск, 1973. - Ч. 2. - С. 173-144.
9. Суржик В.В., Ружников Г.М. Стохастическая устойчивость быстроходных транспортных аппаратов, движущихся вблизи опорной поверхности // Тезисы докладов 24-ой Всесоюзной научно-технической конференции по теории корабля. - Л., 1975.
10. Патент на изобретение №2224671 (РФ). Самостабилизирующийся экраноплан. / Закрытое акционерное общество «Технологии СДП»; авторы изобретения Суржик В.В и др. - Приоритет от 09.01.2003. - № 2003100793.