

УДК 519.71

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ТИПОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПОЛЕТА

В.Н. Ефанов, Л.М. Неугодникова

Предложена имитационная модель пространственного движения летательного аппарата, предназначенная для расчета топливно-временных характеристик типовых траекторий полета, содержащихся в памяти автоматической бортовой системы самолетовождения. Разработан программный комплекс «Компара», позволяющий оценивать параметры опорных траекторий с учетом аэродинамических характеристик конкретного летательного аппарата и принимать решения о выборе наиболее рационального маршрута полета.

Ключевые слова: типовая траектория, топливно-временная оценка, аэродинамика.

Введение

В настоящее время одним из острых вопросов является необходимость глобальной модернизации национальных систем управления воздушным движением. В условиях возрастающей плотности воздушного движения наземные диспетчеры должны будут руководствоваться концепцией тактического (локального) эшелонирования, основанной на параметрах местоположения и вектора скорости самолетов, а не концепцией стратегического эшелонирования, основанной на параметрах траектории полета, что подразумевает выполнение полетов по назначенным маршрутам с заданными высотами и скоростями, как это делается сегодня.

Автоматическая бортовая система управления самолетом (АБСУ) предусматривает выполнение всех сложных навигационных расчетов, включая наиболее точную оценку местоположения самолета по информации, собранной из всех навигационных датчиков, и прогноз поведения других участников воздушного движения с целью предотвращения столкновений. Использование такой системы значительно уменьшает рабочую нагрузку пилота, освобождая экипаж для решения нетривиальных задач, одной из которых является оперативное изменение программы полета.

Современные аэронавигационные базы данных, используемые АБСУ, располагают большим количеством запрограммированных маршрутов полета, снабженных обширным списком аэропортов отправления и прибытия, а также характерными поворотными пунктами маршрута (ППМ). Приводятся расчетные значения времени полета и соответствующие расходы топлива. Однако при использовании таких типовых траекторий возникают следующие трудности:

- в конкретных обстоятельствах оптимальная траектория может не принадлежать к множеству типовых;
- в силу различных причин, в первую очередь связанных с неблагоприятными погодными условиями, конечный пункт маршрута может быть изменен;
- при полете по выбранной траектории необходима серьезная коррекция без изменения пункта назначения.

В описанных условиях перед экипажем встает задача оценки типовых траекторий с учетом индивидуальных характеристик самолета, а также формирования новой опорной траектории. Важным средством решения указанных проблем является использование дополнительной информации о топливно-временных характеристиках таких траекторий, что позволяет сформировать оптимальный план полета.

Как правило, задача определения оптимальной траектории крейсерского полета на заданном эшелоне при заданной полетной массе сводится к нахождению оптималь-

ной крейсерской скорости $V_{эк}$, соответствующей минимуму функции $\frac{dA^*}{dL}$, где под dA^* подразумевается приращение относительного показателя, характеризующего или себестоимость, или прибыль, или приведенную прибыль, а dL – элементарный участок траектории. Экономическая функция

$$A^* = \sum_{i=1}^n \Delta A^*_i \quad (1)$$

определяет эффективность траектории [1]. Таким образом, оптимальная траектория находится как требующая минимальных затрат времени и топлива на каждом из n элементарных участков. Однако в предлагаемой системе в качестве первичного параметра оптимизации выступает показатель интенсивности риска опорной траектории, характеризующий уровень безопасности полета [2], поэтому выбор экономически эффективного варианта из семейства безопасных траекторий выделяется в отдельный этап.

В целом механизм принятия решения с использованием программного комплекса «Компара» показан на рис. 1.

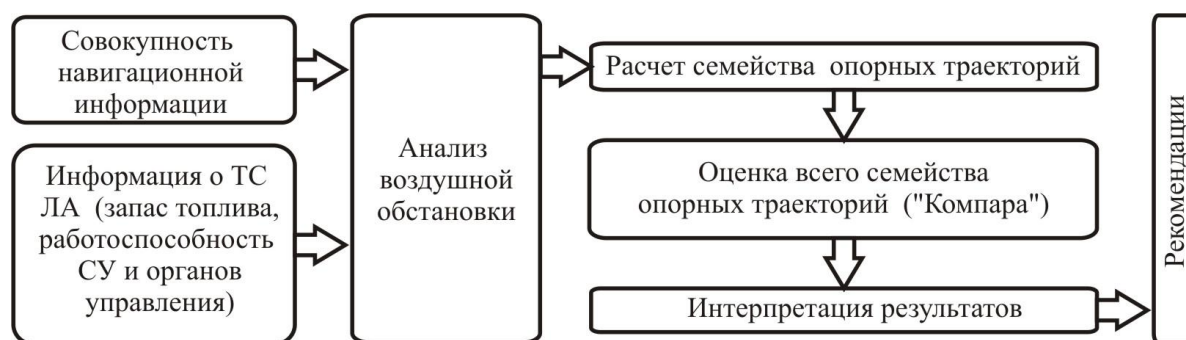


Рис. 1. Принятие решения об оперативном изменении маршрута полета

В процессе полета АБСУ непрерывно анализирует меняющуюся воздушную обстановку и при обнаружении угрозы безопасности формирует и предлагает возможные маршруты преодоления опасных участков. Выбор оптимальной траектории возможен только после всесторонней оценки всех вариантов. Разработанный программный комплекс «Компара» позволяет оценить топливно-временные характеристики рассматриваемой траектории. Задача интерпретации полученных результатов сводится к сравнительной оценке семейства траекторий, позволяющей выработать рекомендации к каждому варианту.

Постановка задачи

Предлагается программный комплекс сравнительной оценки маршрутов полета, базирующийся на результатах моделирования полета самолета по заданной совокупности типовых и сформированных для конкретного случая траекторий. С этой целью в работе решаются следующие задачи:

- разработка имитационной модели для оценки топливно-временных характеристик траекторий на основе исследования пространственного движения летательного аппарата (ЛА);
- апробация разработанных инструментальных средств на примере самолета ТУ-204.

Рассматривается установившееся движение – полет на постоянной высоте со скоростью, не превышающей заданное крейсерское значение на $\pm 0,05 M$. Максимальная

скорость пассажирского среднемагистрального самолета не достигает 1 M , в таком случае динамика движения ЛА может быть описана системой

$$\left. \begin{aligned} P &= Q + G \cdot \sin \vartheta \\ G &= Y \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где P – необходимая тяга, Q – лобовое сопротивление, G – сила тяжести, Y – подъемная сила, ϑ – угол тангажа.

Поворот траектории в ППМе может быть реализован на вираже по дуге расчетного радиуса. Уравнения динамики ЛА в этом случае описываются системой

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= P_p \cdot \cos \alpha - Q \\ G &= Y \cdot \cos \gamma_c \\ Y \cdot \sin \gamma_c &= + \frac{mV^2}{r} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где V – воздушная скорость, m – масса, r – расчетный радиус виража, α – угол атаки, γ_c – угол крена, P_p – располагаемая тяга. Подробно расчет виража приведен в [3]. Основные параметры оценки траекторий – следующие:

- время полета $t = \sum_{i=1}^n \Delta t$;
- длина пути $L = \int_0^t V \Delta t$;
- запас топлива для обеспечения необходимой тяги в полете, аналогично (1),

$$M_f = \int_0^t P_t P dt, \text{ где } P_t - \text{удельный расход топлива.}$$

Программная реализация имитационной модели пространственного движения летательного аппарата

Для решения поставленных задач предлагается программный комплекс оценки типовых траекторий «Компара», разработанный в системе MATLAB (точность вычислений в MATLAB достаточна для решения основной задачи – сравнительной оценки траекторий) и представляющий собой совокупность программ и файл-функций, а также пакет данных в виде текстовых файлов (рис. 2).

Перед запуском «Компары» необходимо выбрать условия полета – высоту (по умолчанию – 11 км) и начальную скорость (по умолчанию – 0,72 M , что на высоте 11 км соответствует 818 км/ч). В процессе работы загружаются следующие данные: физические константы, геометрические характеристики самолета (по умолчанию – ТУ-204 [4]), характеристики силовой установки (по умолчанию – ТРДД ПС-90А [5]) и тестируемая траектория. Исследуемые траектории могут быть сформированы для конкретных условий полета, заданы пользователем либо загружены из специальных баз данных. Перечисленные значения хранятся в рабочей папке MATLAB в виде текстовых файлов.

Расчетная траектория представляет собой чередование прямолинейных участков, соединенных дугами (виражами) с началом в точке стандартной схемы вылета по приборам (ССВП) и окончанием в точке стандартного маршрута входа в зону аэродрома прибытия (СВАП). Дальнейший алгоритм показан на рис. 3. В графических окнах выводятся следующие зависимости:

- исходные и расчетные траектории;

- изменение скорости полета и полярны во времени;
- углы крена и атаки, мгновенный расход, потребная тяга, перегрузка и коэффициент подъемной силы в каждый момент времени – по запросу пользователя.

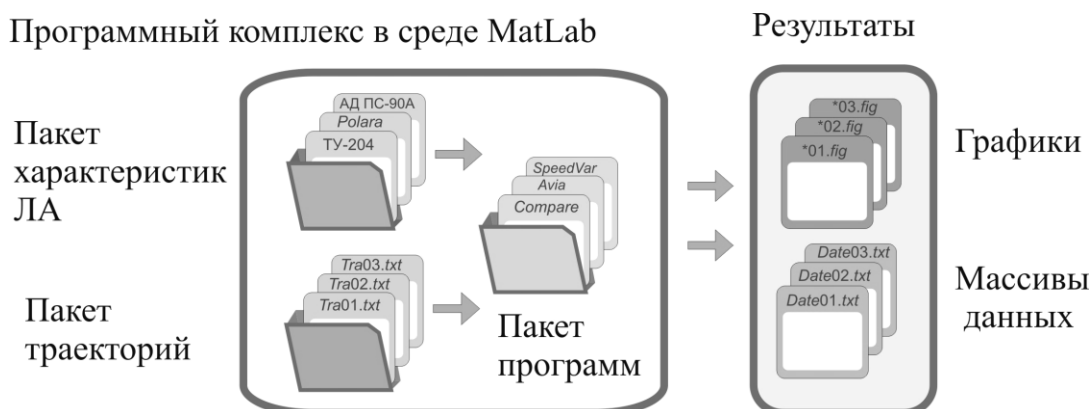


Рис. 2. Программный комплекс «Компара»



Рис. 3. Алгоритм работы программного комплекса «Компара»

Результаты моделирования

Для оценки эффективности разработанного программного комплекса рассмотрим возможности оперативного изменения маршрута движения при возникновении непредвиденных факторов. С этой целью проведем сравнительный анализ возможных траекторий полета на одинаковой высоте, с одинаковыми исходными и конечными точками в условиях, когда между точками ССВП и СВАП находятся обширные опасные метеообразования, не позволяющие проложить прямолинейный маршрут (рис. 4).

Бортовой оперативно-советующей системой предложены 3 варианта траекторий преодоления угроз. Траектория 1 состоит из ССВП, ППМ11, СВАП. Траектория 2 состоит из ССВП, ППМ21, ППМ22, ППМ23, СВАП. Траектория 3 состоит из ССВП,

ППМ31, ППМ32, СВАП. Нулевой обозначена прямолинейная траектория, на рисунке показана пунктиром.

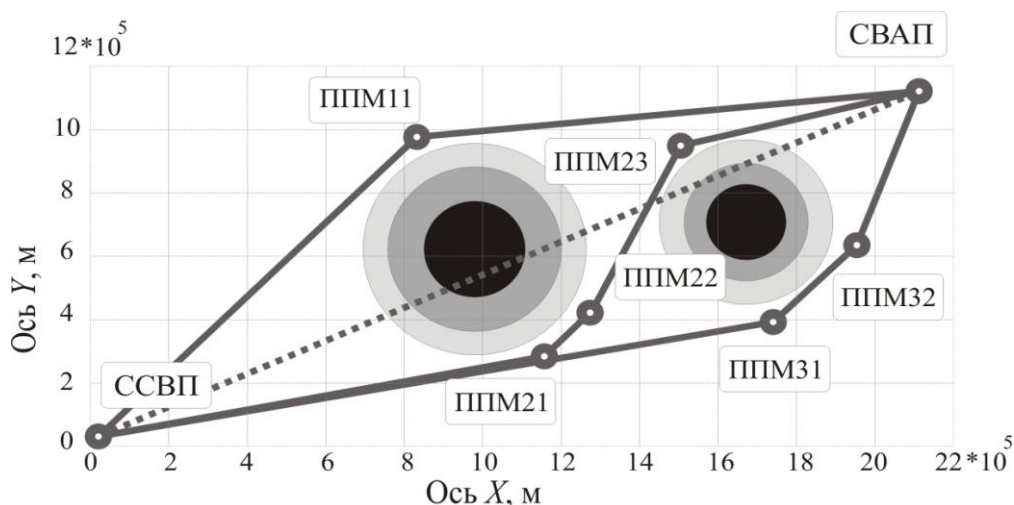


Рис. 4. Варианты безопасных траекторий

Проведем сравнительный анализ этих траекторий. Пусть полет происходит в следующих условиях: высота – 11 км, крейсерская скорость – $M=0,77$, начальная масса самолета – 95 т. За время прохождения ППМа принято время завершения маневра. В таблице приведена сравнительная характеристика тестируемых траекторий. Для наглядности значения величин прямолинейной траектории приняты равными 100 %.

Номер траектории	Время полета		Пройденный путь		Расход топлива	
	с	%	км	%	кг	%
0	10648	100	2408	100	19039	100
1	11282	105,95	2552	105,98	20164	105,9
2	11388	106,94	2576	106,97	20368	106,98
3	11620	109,13	2629	109,18	20777	109,13

Таблица. Сравнительные характеристики траекторий

Проанализировав таблицу, можно сделать вывод, что наименьшая длина безопасной траектории ССВП–СВАП составляет 2552 км, 105,89 % от прямолинейной, следовательно, самой экономически выгодной оказалась траектория 1. Также заметим, что выполнение маневров (виражей) требует большего расхода топлива, чем прямолинейный полет, поэтому при сравнении траекторий 1 и 2 разница во времени составляет 0,99 %, а по расходу – 1,01 %. В итоге при возникновении ситуации, подобной показанной на рисунке, на основе результатов, выданных «Компарой», можно сформулировать следующие рекомендации:

- сначала обогнуть большую по площади опасность и затем проложить прямолинейный курс к пункту назначения (траектория 1);
- попытка «проскочить» между опасными участками не имеет смысла – выигрыш по времени и расходу отсутствует (траектория 2);
- не следует двигаться по траектории, все дальше отклоняющейся от первоначального курса (траектория 3).

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет проводить сравнительную оценку топливно-временных характеристик семейства опорных траекторий и решать следующие задачи:

- проводить анализ траекторий, проложенных на различных высотах;
- проводить анализ траекторий, проложенных на одной высоте, содержащих различное количество несовпадающих ППМов.

При этом программный комплекс «Компара» предоставляет пользователю следующие возможности:

- проводить анализ траекторий для широкого парка современных самолетов в диапазоне скоростей $M < 1$;
- осуществлять оценку любых маршрутов полета – как загруженных из специальных баз данных, так и заданных пользователем;
- обеспечивать наглядность и удобство представления результатов – в виде графиков или текстовых файлов.

Таким образом, программный комплекс «Компара» обеспечивает информационную поддержку принятия решения об оперативном изменении маршрута полета, предоставляя для каждой из анализируемых опорных траекторий количественные оценки их топливно-временных параметров. В дальнейшем планируется расширение функциональных возможностей разработанного программного комплекса с целью обеспечения анализа пространственных трехмерных траекторий, а также последующая его интеграция с программным модулем оптимизации траектории полета по критерию минимума риска.

Исследования выполнялись в рамках совместных работ с корпорацией «Аэрокосмическое оборудование» по созданию комплекса авионики пятого поколения.

Литература

1. Скрипниченко С.Ю. Оптимизация режимов полета по экономическим критериям. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 152 с.
2. Неугодникова Л.М. Интеллектуальная система планирования полета летательного аппарата по критерию минимума риска // Третья Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых (20–23 февраля 2008 г.): Сборник статей Том 2. – Уфа: УГАТУ, 2008. – С. 61–68.
3. Аэромеханика полета. Динамика самолета: Учебник для авиационных вузов / Бочкарев А.С., Андреевский В.В., Белоконов В.М. и др.; Под ред. Бочкарева А.С. и Андреевского В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
4. Ригмант В.В. ТУ-204 – пПрошлое, настоящее, будущее // Аэрокосмическое обозрение. – 2006. – № 2. – С. 88–93.
5. ОАО «Авиадвигатель» – ОАО «Пермский моторный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avid.ru/products>, свободный
6. Ефанов В.Н. Бортовые системы управления полетом: путь к свободному воздушному пространству // Мир авионики. – 2000. – № 1. – С. 11–21.

- Ефанов Владимир Николаевич* – Уфимский государственный авиационный технический университет, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, efanov@mail.rb.ru
- Неугодникова Любовь Михайловна* – Уфимский государственный авиационный технический университет, магистр, соискатель, Grifon_love@mail.ru