

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМИЗАЦИИ  
ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
С ДВИГАТЕЛЯМИ МАЛОЙ ТЯГИ**

Под задачей оптимизации космического аппарата (КА), предназначенного для выполнения манёвра, определяемого вектором целевых условий  $\bar{z} \in Z$ , понимается задача отыскания вектора проектных параметров  $\bar{p} \in P$  и векторов-функций  $\bar{x}(t, z)$ ,  $\bar{u}(t, x, z)$  задающих состояние и управление из допустимого множества  $D$  и доставляющих максимум критерию  $\mu$  [1]:

$$(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}) = \operatorname{arg\,max}_{(x, u) \in D(z), p \in P} \mu(z, p, x(t), u(t, x)). \quad (1)$$

Задачу оптимизации перелётов с двигателями малой тяги можно условно разделить на проектную и динамическую. Проектная часть состоит в определении оптимального вектора проектных параметров, а динамическая – в оптимизации управления и соответствующих траекторий движения.

Оптимальные проектные параметры во многом определяются выбранными траекториями и режимами управления. Для решения динамической задачи оптимизации при фиксированных проектных параметрах могут использоваться следующие критерии:

$$T(x(t), u(t, x)) \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$m_{пр}(x(t), u(t, x)) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $m_{пр}$  – масса израсходованного на перелёт рабочего тела,  $T$  – время перелёта.

Методы решения динамической части задачи в постановке (2) или (3), детально освещённые в [2], основываются на принципе максимума Понтрягина и сводятся к решению соответствующих краевых задач.

Решение краевой задачи при большом количестве подбираемых параметров является сложным итерационным процессом. Поэтому для решения задач подобного рода целесообразно применять информационно-вычислительные системы, основанные на базе данных (БД), которая содержит используемые в расчётах исходные проектные и баллистические параметры конкретных перелётов и соответствующие им результаты, полученные после проведения оптимизации.

Необходимость применения БД обусловлена тем, что сходимость численных ме-

тодов, применяемых в решении краевых задач, для математических моделей с оптимальным законом управления зависит от начальных условий (начальные значения вектора сопряжённых множителей  $\bar{\psi}(t_0)$ ). Если эти значения получены для близких значений исходных данных, то положительный результат гарантируется даже для четырёх и шестипараметрических краевых задач. Таким образом, расширение БД с результатами оптимизации программ управления и соответствующих им траекторий движения аппарата для различных исходных проектных и баллистических параметров, упрощает процесс оптимизации перелётов КА с малой тягой для сложных математических моделей. Структура созданной БД приведена на рис. 1.

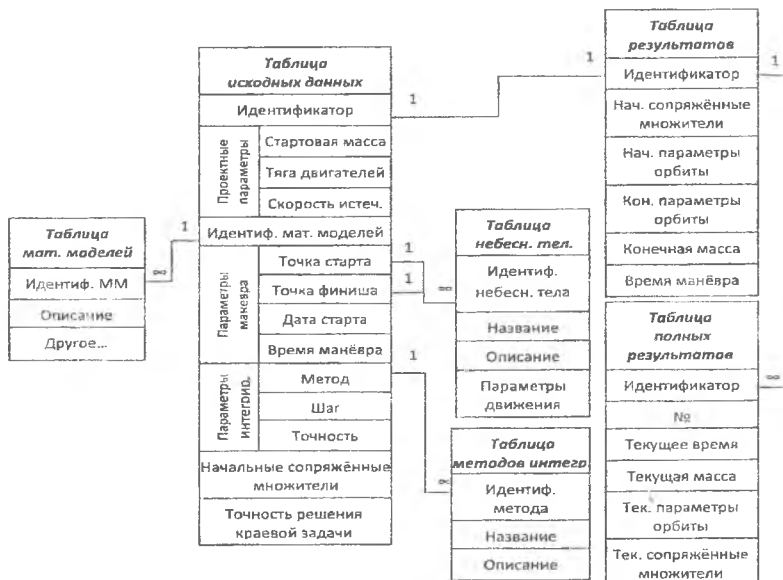


Рис. 1. Структура БД

По мере расширения круга задач, решаемых в рамках оптимизации перелётов КА с двигателями малой тяги, приведённая структура (рис. 1) может трансформироваться и усложняться, но при этом не должна нарушаться целостность данных.

При отсутствии в БД необходимых параметров для решения основной задачи оптимизации с критериями (2) или (3) при заданных исходных данных, необходимо воспользоваться методикой усложнения математических моделей и расширить область «удачных» решений. Схема проведения расчёта по такой методике для гелиоцентрических участков движения КА приведена на рис. 2.

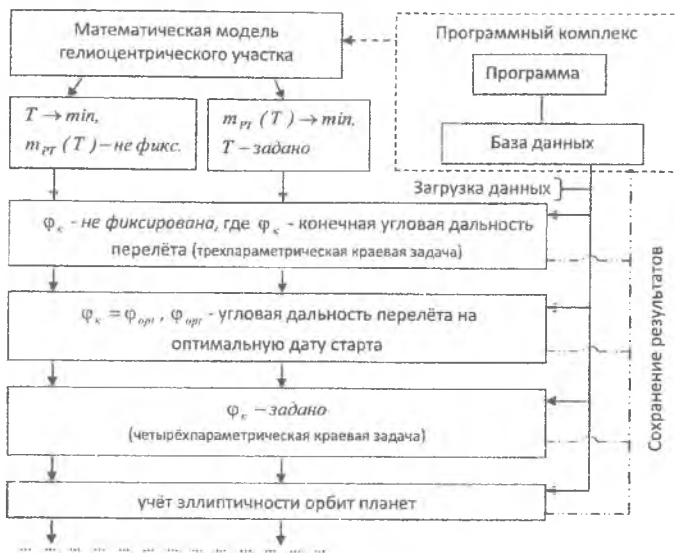


Рис. 2. Схема расчётов гелиоцентрического участка полёта при усложнении математических моделей

Решая задачу в постановках (2) и (3) для сложных моделей движения (с учётом эллиптичности орбит планет и некомпланарности), необходимо использовать вектор сопряжённых множителей  $\bar{\psi}(t_0)$ , полученный для более простых моделей. Если решение при этом будет расходиться, то следует перемещаться последовательно по фазовым координатам старта и финиша:  $\bar{x}(t_0)$  и  $\bar{x}(T)$  соответственно.

С помощью программного комплекса получены результаты в рамках модели компланарного движения между круговыми орбитами по траектории Земля-Мартс с критерием (3) для разных проектных параметров (тяги двигателей). Часть интерфейса с этими результатами показана на рис. 3.



Рис. 3. Интерфейс программного комплекса с таблицами в БД

Таким образом, описанные в [2] методы эффективны при проведении оптимизации перелётов с малой тягой, и развитие и расширение БД значительно упрощает процесс оптимизации гелиоцентрических участков перелёта для задач со сложными математическими моделями.

#### Библиографический список

1. Салмин, В.В. Методы решения вариационных задач механики космического полёта с малой тягой [Текст]/ В.В. Салмин, С.А. Ишков, О.Л. Старинова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2006. – 164 с.
2. Старинова, О.Л. Система интеллектуализированной поддержки оптимизации межпланетных миссий космических аппаратов с малой тягой [Текст]/ О.Л. Старинова. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – №1 (14). – 68-79 с.