

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мина Тейна на тему «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 - «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

**Актуальность.** В диссертационной работе Мина Тейна рассматривается *актуальная* проблема оптимизации сложных траекторий межпланетных и межорбитальных перелетов космического аппарата (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ). При этом автор применяет принцип максимума Л. С. Понтрягина, позволяющий свести задачу оптимального управления к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Традиционно, решение краевой задачи сводится к численному решению системы трансцендентных уравнений. Решение такой системы во многих случаях связано с большими трудностями, неясными остаются вопросы существования такого решения и его единственность.

**Научная новизна.** Для преодоления этих трудностей автор предлагает анализировать задачу безусловной минимизации скалярной функции неизвестных переменных, представляющей сумму квадратов невязок для рассматриваемой краевой задачи. Эта функция принимает только неотрицательные значения. Её нижняя грань равна нулю. Эта грань достижима только на тех значениях переменных, которые удовлетворяют условиям краевой задачи. Для минимизации этой функции используется новый численный метод эволюционной стратегии (Evolution Strategy) с адаптацией ковариационной матрицы (Covariance Matrix Adaptation) (CMAES). Он представляет собой модифицированную эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы, построенную на основе использования механизмов так называемой «направленной» селекции и

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
" 06 20 18 г.

мутации и реализующую в структуре своего алгоритма некоторый аналог «псевдо детерминированного» процесса эволюции.

**Значимость для науки и практики полученных результатов.** К достижениям автора диссертационной работы следует отнести разработанную им универсальную методику оптимизации сложных схем межпланетного перелета КА с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета. При этом задача оптимизации сложной схемы межпланетного перелета формулируется как задача поиска безусловного экстремума. В этой задаче минимизируемая функция, зависящая от большого числа переменных, имеет большое число локальных минимумов, и нахождение глобального минимума является очень сложной задачей. Автор тестировал возможность использования нескольких стохастических, локальных и гибридных методов оптимизации для нахождения хорошего минимума (возможного глобального минимума). В приведенных в диссертации тестах автор показал, что предлагаемый им подход с использованием метода СМАЕС является эффективным. Метод оказывается малочувствительным к начальному приближению неизвестных параметров краевой задачи.

**Достоверность утверждений автора диссертации.** Такой вывод автор подтверждает приведенным в диссертации анализом прямого перелета КА с электроракетной двигательной установкой к Марсу. При решении этой тестовой задачи автор провел сравнительный анализ возможности использования нескольких известных методов минимизации функции многих переменных. Результаты сравнения подтверждают утверждение автора диссертации о том, что метод СМАЕС в отличие от других методов малочувствителен к выбору начального приближения.

Автор приводит численные результаты использования предлагаемого им подхода для оптимизации конкретных сложных схем межпланетных

перелетов КА с традиционными химическими двигателями к Юпитеру и Сатурну. Решение такой задачи кроме самостоятельного интереса может быть использована как вспомогательная задача при проектировании сложных маршрутов КА с электроракетной двигательной установкой. Как показывает автор диссертации, решение этой задачи позволяет выявить рациональные маршруты и некоторые их характеристики (например, характерные даты маршрута), которые можно использовать как начальные приближения для нахождения оптимальной схемы перелета КА с электроракетной двигательной установкой.

Применение автором предложенной им методики демонстрирует ее высокую эффективность для различных постановок задач оптимизации траекторий межорбитальных и межпланетных перелетов КА с электроракетной двигательной установкой.

**Критические замечания.** Считаю целесообразным отметить и ряд недостатков, содержащихся в автореферате рассматриваемой работы:

- сходимость предлагаемого автором алгоритма CMA-ES зависит от задаваемого количества популяций. Чем больше популяций задано, тем лучше сходимость алгоритма. Таким образом, чтобы обеспечить хорошую сходимость нужно задавать достаточное большое количество популяций, что снижает скорость расчёта по сравнению с, например, локальными методами оптимизации;
- при анализе межпланетного перелёта от Земли к Юпитеру, автор не учитывает влияние на движение КА гравитационного поля планеты назначения, хотя, как известно, Юпитер обладает достаточно протяжённым и сильным гравитационным полем.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки работы. Судя по автореферату, диссертация является самостоятельным и оригинальным исследованием, содержащим научную новизну. Предлагаемые

методы исследования и оптимизации свидетельствуют о достоверности и обоснованности полученных в диссертации результатов.

**Общий вывод.** Судя по автореферату, диссертация Мина Тейна представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Приведенные в автореферате диссертации результаты работы позволяют квалифицировать ее как решение важной научно-технической проблемы повышения эффективности космических транспортных систем и развития методов механики космического полета с малой тягой.

Диссертационная работа полностью соответствует критериям «Положения о порядке присуждения научных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Мин Тейн заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Исполнитель ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

Эйсмонт Натан Андреевич

каркас заверше