

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника
Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН

Ивашкина Вячеслава Васильевича

на диссертацию **Нгуена Нгока Диена** по теме

«Проектирование траекторий межпланетных перелётов КА с электроракетной
двигательной установкой с учетом нештатного временного выключения двигателя»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности **05.07.09**

«динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

В рецензируемой диссертационной работе рассматривается возможность использования перспективных электроракетных двигательных установок для реализации сложных схем межпланетного перелета, включающих гравитационные маневры. Использование таких схем полета и таких двигательных установок, имеющих высокий удельный импульс, может привести к существенному снижению требований по величине массы КА, выводимого ракетами-носителями, по массе требуемого на межпланетный перелет топлива, к увеличению массы КА, доставляемого на рабочую орбиту, и поэтому к увеличению объема научных исследований, который может выполнить КА. Всё это может привести к увеличению эффективности проекта, к уменьшению стоимости космической программы. Это дает возможность утверждать, что диссертационное исследование выполнено на *актуальную тему*.

В диссертационной работе автором рассмотрен важный момент практической реализации электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) в космическом полете. Он предлагает при проектировании траектории межпланетного перелета КА с ЭРДУ учитывать возможность временного аварийного выключения двигателя. Автор анализирует траекторные возмущения, которые возникают из-за такого отклонения, на этапе выбора (проектирования) траектории межпланетного КА. В работе показывается, что, если траектория межпланетного перелета КА с ЭРДУ

выбрана оптимальной по массовым критериям (например, по критерию максимальной конечной массы, доставляемой в окрестность планеты назначения), но без учета возможного временного отключения двигателя, то на траектории перелета могут существовать такие критические интервалы, где отключение ЭРДУ даже на небольшое время приводит к невозможности затем парировать траекторные возмущения, возникающие от этого выключения двигателя. Это приводит к невозможности решения поставленной задачи. Отсюда автор пришел к выводу, что уже на этапе проектирования траектории полета надо предусмотреть такую возможность отключения ДУ и с учетом этого попытаться определить траекторию, более устойчивую к таким возмущениям.

Такая постановка задачи является *новой*. Автор вводит *новый критерий оптимизации* траектории межпланетного перелета КА с ЭРДУ. Этим критерием рассматривается максимальная допустимая продолжительность временного нештатного выключения двигателя в любой точке любого активного участка траектории перелета, возмущение от которого может быть парировано коррекцией закона управления дальнейшим движением КА, так, чтобы баллистическая задача реализуемого проекта оказалась выполненной. Как ограничение при этом рассматривается располагаемый запас топлива. Полагаю, что такая постановка проблемы оптимизации траектории межпланетного КА с ЭРДУ является *новой и важной для практики* при разработке перспективных межпланетных проектов.

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Во **введении** сформулированы цели и задачи исследования. В **первой главе** рассматриваются математические модели, описывающие движение КА для рассматриваемых схем межпланетного перелета с гравитационными маневрами у планет. Анализ траектории полета КА ведется в рамках модели точечных сфер действия планет. Геоцентрический разгон исследуется в импульсном приближении. При анализе первого гелиоцентрического участка полета КА «Земля-Земля» учитывается поле притяжения Солнца как точечной массы и тяга ЭРДУ. Для других гелиоцентрических участков полет КА – пассивный, тяга ЭРДУ не включается в номинале, орбиты КА определяются решением задачи Эйлера-Ламберта. При анализе гравитационных маневров рассматривается пассивный облет планет. На

основе принципа максимума Понтрягина получена система уравнений оптимального управления, включающая дифференциальные уравнения для фазовых и сопряженных переменных. **Во второй главе** описаны численные методы, используемые для интегрирования систем дифференциальных уравнений и для решения краевой задачи. **В третьей главе** формулируется задача определения и оптимизации траектории КА. При этом сначала делается предварительный анализ заключительной части траектории после гравитационного маневра у Земли до конечной точки траектории и определяются ее параметры, в частности, такие как дата гравитационного маневра у Земли и вектор гиперболического избытка скорости после этого маневра. Оптимизация траектории КА сводится к оптимизации трех участков первой части полета: геоцентрического участка при старте от Земли, гелиоцентрического перелета Земля - Земля, участка гравитационного маневра у Земли. На основе принципа максимума Понтрягина выводятся условия оптимальности полета и краевые условия. Определение траектории сводится к решению краевой задачи с 8 неизвестными параметрами и 8 краевыми условиями.

В четвертой главе, являющейся в идейном отношении, по-видимому, центральной, дается постановка задачи о возможности нештатного выключения ЭРДУ и о проектировании траектории, на которой можно демпфировать возникающие возмущения. Разработаны методики анализа возмущений от временной остановки ЭРДУ и формирования новой номинальной траектории КА с введением одного или нескольких пассивных участков, на которой можно наилучшим образом с учетом возможностей по запасу топлива «противостоять» таким возмущениям, быть более устойчивой к ним.

В пятой главе приводятся результаты проектирования траектории перелета к Венере с последующей последовательностью гравитационных маневров у Венеры для формирования гелиоцентрических орбит с низким перигелием и большим наклоном для исследования Солнца. В соответствие с предложенным подходом были получены новые номинальные траектории, отличающиеся дополнительными пассивными участками и более длительным последним пассивным участком. Это существенно повысило устойчивость траекторий к возможности отключения ЭРДУ.

В шестой главе приводятся результаты проектирования траектории перелета к Юпитеру с солнечной ЭРДУ с анализом возможности нештатного выключения

ЭРДУ. Полученная автором новая номинальная траектория с введением двух пассивных участков заметно более устойчива к возможному выключению ЭРДУ.

На основе анализа работы можно сделать вывод, что в диссертационной работе автор:

с одной стороны, предложил новый подход к проектированию межпланетной траектории КА с ЭРДУ, учитывающий необходимость обеспечения парирования возмущений, связанных с аварийным временным выключением двигателя;

с другой стороны, разработал новый метод нахождения номинальной траектории КА с ЭРДУ, при реализации которой допускается достаточно большая продолжительность временного выключения двигателя. Метод сводится к введению дополнительных пассивных участков на траектории гелиоцентрического перелета. Характеристики пассивных участков (их число, положение на траектории и их длительность) рассматриваются в работе как выбираемые оптимизируемые параметры схемы перелета. Этот прием можно считать *интересной и новой идеей*, которую целесообразно иметь в виду и использовать при проектировании межпланетных перелетов КА с ЭРДУ.

Считаю, что предлагаемая в диссертационной работе новая постановка проблемы проектирования межпланетных траекторий КА с ЭРДУ, идея введения на траектории перелета пассивных участков и выбор характеристик этих участков является достаточно обоснованными. Их *обоснованность* подтверждена глубоким исследованием двух межпланетных проектов, проанализированных в диссертации, в главах 5 и 6. Используя разработанные методики, автор выполнил очень большой объем расчетов, определил много новых траекторий для данных двух космических проектов с учетом возможности временного отключения ЭРДУ: для проекта исследования Солнца с помощью орбит с низким перигелием и для проекта исследования Юпитера.

По рецензируемой диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

- 1) В Диссертации автор недостаточно полно объяснил сделанное сведение задачи оптимизации всей траектории КА от старта до конечной точки к задаче оптимизации первых трех участков полета (п. 3.1). Автор, к тому же, совсем не

обсуждает возможность варьирования характеристик всей траектории, в частности, варьирования времени гравитационного маневра у Земли, для парирования возмущений от временного выключения ЭРДУ.

- 2) В Диссертации нет вывода условий оптимальности траектории, они взяты без вывода из ранее опубликованной статьи (п. 3.2).
- 3) Недостаточно полно пояснены условия, для которых получены номинальные характеристики первого проекта, исследованного автором – полета к Венере для последующего формирования орбит полета к Солнцу. Аналогично, автор неполно пояснил условия, для которых получены номинальные характеристики второго исследованного проекта – полета к Юпитеру. И довольно схематично описаны эти проекты.
- 4) Есть ряд редакционных замечаний, в частности:
 - а) отмеченный в Автореферате как материал второй главы в Диссертации дан в третьей главе «Формулировка задачи проектирования...». А данный в Автореферате как материал третьей главы в Диссертации приведен во второй главе «Используемые численные методы».
 - б) Не пояснен в Диссертации и Автореферате второй параметр гравитационного маневра, определяющий плоскость облета планеты (стр. 19 Дис.).

Считаю, что приведенные замечания не снижают научной и практической ценности проведенного исследования.

Диссертация отличается теоретической новизной и практической важностью исследования. Автор не только выдвинул новую важную идею, но и разработал эффективные методы ее реализации, на основе которых выполнил большую трудоемкую работу по анализу двух важных сложных космических проектов.

Диссертационная работа Нгуена Н.Д. написана достаточно четким языком с хорошей логической последовательностью изложения. Основные результаты работы достаточно полно опубликованы в статьях в изданиях перечня ВАК. Основные результаты прошли апробацию на конференциях различного уровня. Считаю возможным рекомендовать автору представить разработанный комплекс программно-математического обеспечения для оптимизации межпланетных

траекторий КА, оснащенных электроракетными двигательными установками, при использовании гравитационного маневра у Земли для государственной регистрации. А данная диссертация вполне может стать основой книги по данной проблеме.

Содержание диссертации соответствует специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

На основе вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Нгуена Нгока Диена «Проектирование траекторий межпланетных перелётов КА с электроракетной двигательной установкой с учетом нештатного временного выключения двигателя» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора технических наук профессора М.С. Константинова, содержащей новую постановку и решение актуальной проблемы проектирования траектории межпланетного перелета с гравитационными маневрами космического аппарата с электроракетной двигательной установкой.

Диссертационная работа Нгуена Нгока Диена соответствует требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Главный научный сотрудник
Института прикладной математики
имени М.В.Келдыша РАН,
профессор, доктор физико-математических наук

В.В.Ивашкин
2/VI-2015

Вячеслав Васильевич Ивашкин

Подпись главного научного сотрудника,
профессора, доктора физико-математических наук
Вячеслава Васильевича Ивашкина заверяю:

Ученый секретарь
К.ф.м.н. *М.В.Келдыша РАН*
Маслов

