

## Отзыв научного руководителя

о диссертанте Старченко Александре Евгеньевиче и его диссертации на тему «Траектории многовитковых перелётов космических аппаратов с минимальной радиационной нагрузкой», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Александр Евгеньевич Старченко является выпускником кафедры Московского физико-технического института «Аэрофизическая механика и управление движением» на базе ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», которую окончил в 2013 году. После окончания магистратуры Старченко А. Е. работал инженером-математиком в ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» до 2018 года. За время работы на предприятии Старченко А.Е. зарекомендовал себя грамотным и высококвалифицированным специалистом. Старченко А.Е. участвовал в разработке бортового программного обеспечения (ПО) автоматических космических аппаратов (КА) AngoSat-1 и EgyptSat-A в части алгоритма построения одноосной солнечной ориентации КА с помощью газовых двигателей. Разработанный Старченко А.Е. алгоритм успешно отработал во время полёта КА AngoSat-1 после разделения с разгонным блоком на этапе построения начальной ориентации. Старченко А.Е. участвовал в разработке резервных алгоритмов определения ориентации автоматических КА в случае возникновения нештатных ситуаций, занимался разработкой бортового и наземного ПО международной космической станции (МКС), в том числе ПО системы управления движением и навигацией служебного модуля и разрабатываемого научно-энергетического модуля. Участвовал в теоретической и практической реализации программы расчета траекторий оптимальных разворотов МКС. В 2018 и 2019 годах алгоритм отслеживания оптимальной траектории разворота МКС, в разработке которого Старченко А.Е. непосредственно

участвовал, успешно отработал на борту во время соответствующих космических экспериментов. Разработанный алгоритм позволил на порядок уменьшить расход топлива на разворот МКС по сравнению с ранее используемыми алгоритмами.

Параллельно с 2013 по 2017 год Александр Евгеньевич обучался в аспирантуре Московского физико-технического института, где научным руководителем у него был академик РАН, д.т.н., профессор Легостаев Виктор Павлович. В связи со смертью Виктора Павловича в 2015 году Старченко А.Е. написал заявление в аспирантуру о назначении Петухова В.Г. своим научным руководителем, которое было удовлетворено. В настоящее время Старченко А. Е. является сотрудником научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики МАИ (НИИ ПМЭ МАИ). Диссертационное исследование Старченко А.Е. выполнил в большей степени в НИИ ПМЭ МАИ. В качестве направления исследования диссертант выбрал тематику оптимизации траекторий перелёта КА с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) с целью снижения влияния космической радиации на бортовые системы КА.

В диссертационной работе А.Е. Старченко рассмотрел две прикладные задачи: задачу минимизации поглощенной дозы радиации при выведении КА с ЭРДУ с низкой околоземной орбиты на геостационарную орбиту (ГСО) и задачу минимизации деградации солнечных батарей при выведении КА с ЭРДУ с промежуточной высокоэллиптической орбиты на ГСО. Первая задача актуальна для случая использования межорбитальных буксиров с ЭРДУ большой мощности (например, на основе транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса), а вторая – при реализации комбинированных схем выведения современных и перспективных геостационарных КА с ЭРДУ. Актуальность рассмотренных задач связана со значительной радиационной нагрузкой на бортовые системы КА с ЭРДУ при его выведении на ГСО с низких и высокоэллиптических орбит. Снижение

радиационной нагрузки позволяет снизить массу защиты и технические риски при реализации рассматриваемых миссий.

В ходе работы над диссертацией А.Е. Старченко продемонстрировал глубокие знания в области механики космического полета, владение методами исследования и проектирования траекторий КА с ЭРДУ, вычислительными методами и программированием.

Для решения поставленных задач диссертант использовал подход, основанный на применении принципа максимума для сведения задачи оптимального управления к краевой задаче и метод непрерывного продолжения по параметру для сведения краевой задачи к задаче Коши. Следует отметить сложность практической реализации этой схемы для многовитковых перелетов КА с ЭРДУ, которая включает в себя численное интегрирование вложенных систем дифференциальных уравнений, необходимость вычисления производных от невязок краевой задачи по начальным значениям сопряженных переменных для вычисления правых частей дифференциальных уравнений метода продолжения и численного осреднения правых частей дифференциальных уравнений оптимального движения КА. Автором разработан метод, в котором в качестве начального приближения для решения задач минимизации поглощенной дозы радиации и минимизации деградации солнечных батарей использовалось решение задачи оптимального быстрогодействия, а уменьшение дозы или степени деградации достигалось непрерывным продолжением из этого решения в оптимальные траектории меньшими значениями накопленной дозы или степени деградации солнечных батарей. Такой подход позволил определить зависимость минимальной дозы (или степени деградации) от длительности перелета.

Отдельного упоминания заслуживает значительный объем работы, проведенной диссертантом в целях адаптации математической модели для расчета поглощенной дозы радиации (или степени деградации солнечных

батареи) к задачам оптимального управления. Существующие математические модели радиационных поясов Земли AE8/AP8, AE9/AP9 не определяют гладких непрерывных зависимостей потоков заряженных частиц от координат КА и времени, поэтому их применение в методах решения задач оптимального управления, требующих вычисления производных от этих потоков по орбитальным элементам и времени оказывается крайне неэффективным. Более того, во многих случаях эта особенность модели приводит к отказам численных методов решения краевой задачи. Для преодоления этого недостатка диссертант разработал сглаженные модели эквивалентного потока и мощности поглощенной дозы.

В диссертации А.Е.Старченко получен ряд интересных результатов, характеризующих свойства оптимальных траекторий с минимальной радиационной нагрузкой. Одним из таких результатов является эволюция эксцентриситета с уменьшением суммарной поглощенной дозы при перелете между низкой околоземной орбитой с большим наклоном и ГСО. На траектории оптимального быстрого действия (без ограничений на дозу) имеется максимум эксцентриситета в середине перелета. При относительно малом снижении суммарной поглощенной дозы характер изменения эксцентриситета по времени остается таким же, однако, начиная с некоторого критического значения поглощенной дозы максимум эксцентриситета исчезает, и движение происходит по квазикруговым орбитам. Такой характер эволюции эксцентриситета остается неизменным до некоторого второго критического значения поглощенной дозы. При дальнейшем уменьшении дозы на оптимальной траектории опять появляется максимум эксцентриситета, однако при этом оптимальная траектория состоит из двух фаз: на первой фазе движение происходит по квазикруговым орбитам, а на второй фазе эксцентриситет сначала увеличивается, а затем уменьшается до нуля. Вторая фаза движения характерна большим забросом по высоте апогея относительно радиуса конечной орбиты. Другой важный результат связан с изменением формы траектории и характера оптимального управления на

траекториях с ограничениями на поглощенную дозу или степень деградации солнечных батарей. Зоны околоземного пространства с максимальной мощностью дозы на оптимальных траекториях с радиационными ограничениями проходятся при относительно больших значениях наклона, при этом амплитуда колебаний по углу рысканья при прохождении этих зон уменьшается с уменьшением значений суммарной поглощенной дозы или степени деградации. Эти результаты представляют большой теоретический и практический интерес и являются заметным вкладом в теорию оптимальных межорбитальных перелетов с ограничениями на радиационную нагрузку.

С практической точки зрения, важным результатом является демонстрация возможности снижения поглощенной дозы радиации на величину до 40% при незначительном увеличении времени перелета и затрат рабочего тела в случае перелета с низкой круговой околоземной орбиты на ГСО только за счет оптимизации управления (и, соответственно, формы траектории). Результаты проведенного анализа имеют важное значение при проектировании многоразовых межорбитальных буксиров с ЭРДУ большой мощности. Диссертант показал, что при перелете с эллиптической промежуточной орбиты на ГСО (который является составной частью комбинированной схемы выведения, используемой для выведения многих современных и перспективных КА), только за счет оптимизации управления, в ряде случаев можно уменьшить степень деградации солнечных батарей с кремниевыми фотопреобразователями на участке выведения с 20...22% до 15...17%.

Диссертационное исследование можно считать завершённым. А.Е. Старченко опубликовано 35 научных работ (в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК). В публикациях отражены основные научные положения диссертационного исследования.

