

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ИИС им. А.К. Айдамазяна РАН,
г. корр. РАН _____ С.М. Абрамов

_____ 2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Коноваловой Анны Александровны «**Достаточные условия оптимальности управления дискретными системами автоматного типа**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника).

В диссертации исследуется проблема оптимального управления дискретными системами автоматного типа (САТ), предназначенными для описания многоэтапных процессов с переключениями режимов функционирования. Эта тематика является важной для авиационно-космической техники (проектирование многорежимных систем управления летательными аппаратами, бортовых оперативно-советующих систем и т.п.). Наряду с авиационной и ракетно-космической техникой интересные приложения имеются в области робототехники и в экономике.

САТ представляет собой модель динамического автомата с памятью и входит в состав гибридных, логико-динамических, непрерывно-дискретных и других переключаемых систем, которые широко распространены на практике. Все это определяет актуальность диссертационного исследования. Рассматриваемые в диссертации задачи отличаются от классических задач оптимального управления дискретными системами, в которых моменты, переключения заданы. САТ функционирует в непрерывном времени и совершает переключения в некоторые, заранее не заданные, тактовые моменты времени. Количество и сами тактовые моменты находятся в процессе оптимизации функционала, в котором учитываются "затраты" на каждое переключение. Как правило, учет этих затрат оказывает регуляризирующее влияние, делая процессы с



бесконечными переключениями неоптимальными, а решение задачи – более практичным.

Важной особенностью рассматриваемых задач является оптимизация моментов переключения, в результате которой возникают оптимальные процессы с мгновенными многократными переключениями. Заметим, что в дискретных и непрерывно-дискретных системах процессы с мгновенными многократными переключениями не возникают, поскольку тактовые моменты времени фиксированы и не могут варьироваться. В импульсных и дискретно-непрерывных системах мгновенные многократные переключения исключаются, так как все импульсные воздействия, которые в пределе совершаются в один и тот же момент времени, заменяются одним "суммарным" импульсом. Как показано в диссертации, процессы с мгновенными многократными переключениями являются естественным обобщением процессов с однократными переключениями. Хотя условия оптимальности для задач с однократными или мгновенными многократными переключениями имеют отличия, обе задачи решаются при помощи одного и того же алгоритма.

Цель диссертационного исследования состоит в доказательстве достаточных условий оптимальности САТ и разработке на их основе метода синтеза позиционного управления.

Диссертация состоит из введения, трех разделов основной части, заключения и списка использованных источников. Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, приводится обзор работ в области оптимизации гибридных и переключаемых систем управления, раскрывается место данной работы среди работ других авторов. Дана краткая характеристика применяемых в диссертации методов исследования и полученных результатов.

В первом разделе приводятся постановка задачи оптимального управления САТ и достаточные условия оптимальности. Ставятся задачи с произвольным конечным числом переключений и заданным максимально допустимым количеством переключений. Для этих задач применяется новый подход к по-

строению функции цены при помощи вспомогательных, так называемых, условных функций цены. Условия оптимальности тем самым сводятся к существованию последовательности условных функций цены. Установлена связь доказанных достаточных условий с необходимыми, которые выведены из известных условий для динамических систем с автоматной частью. А именно, уравнения для поверхности переключения, полученные из достаточных или необходимых условий, равносильны. Основным результатом, имеющим прикладное значение, является алгоритм синтеза оптимального позиционного управления САТ. Методика применения этого алгоритма раскрывается при аналитическом решении простого примера, а также при численном решении задачи синтеза следящей САТ. Эта задача представляет собой задачу оптимальной кусочно-постоянной аппроксимации заданной (непрерывной) функции с учетом количества точек разрыва.

Во втором разделе ставится задача оптимального управления САТ при мгновенных многократных переключениях. Здесь вводится понятие предела последовательности кусочно-постоянных функций с фиксированным числом точек разрыва. Этот предел используется для определения точек многозначного разрыва кусочно-постоянной функции. Именно такие функции считаются допустимыми траекториями в процессах управления САТ при мгновенных многократных переключениях. Достаточные условия оптимальности процессов с многократными переключениями выводятся при помощи предельного перехода из достаточных условий для процессов с однократными переключениями. Доказывается, что форма уравнений для нахождения условных функций цены в предельном переходе не меняется. Отсюда вытекает применимость алгоритма синтеза, разработанного для однократных переключений, также и в случае мгновенных многократных переключений. Это важное обстоятельство иллюстрируют два методических примера. В одном при помощи алгоритма получено аналитическое решение, в другом – численное. Для решения этих примеров применяется также алгоритм субоптимального синтеза, используемый ранее для САТ, описываемых рекуррентным включением. Сравнение показывает, что

разработанный в диссертации алгоритм лучше по точности и экономичнее по количеству вычислений и объему требуемой памяти.

В третьем разделе рассматривается прикладная задача – задача оптимального по затратам топлива перевода космического аппарата с низкой опорной орбиты на высокую геостационарную орбиту (ГСО). Эта известная в теории управления задача решается при дополнительных ограничениях на количество включений маршевого двигателя и на продолжительность активной фазы полета. Такие ограничения отражают условия эксплуатации разгонного блока "Бриз-М", разработанного в Государственном космическом научно-производственном центре им. М. В. Хруничева. Кроме того, учитывается реализуемая точность выполнения команд включения или выключения двигателя (погрешность не превышает одной секунды). Управление двигателем описывается системой автоматного типа с заданным максимально допустимым количеством переключений. Для нахождения решения задачи применяются необходимые условия оптимальности динамических систем с автоматной частью, а также полученные ранее для задачи без ограничений теоретические результаты о минимизирующих последовательностях. Для численного решения разработана программа, получившая государственную регистрацию (гос. рег. №2014615592). Результаты расчетов показывают, что применяемая на практике трехимпульсная схема вывода спутника на геостационарную орбиту является фактически оптимальной. Лучшая пятиимпульсная схема, найденная в диссертации, требует на 49 кг топлива меньше, чем трехимпульсная. Ясно, что эта незначительная экономия топлива будет потрачена неэффективным образом при двух дополнительных запусках двигателя. Другими словами, в диссертации подтверждается, что применяемая на практике схема вывода спутника на ГСО наиболее экономичная.

Оценивая диссертацию Коноваловой А.А. в целом, отметим следующее. В диссертации доказаны достаточные условия оптимальности дискретных САТ при однократных или мгновенных многократных переключениях. Выведены уравнения для нахождения условных функций цены и условных позиционных

управлений. На основе достаточных условий разработан алгоритм приближенного синтеза оптимальных САТ. Решены модельные примеры, иллюстрирующие эффективность разработанного алгоритма при однократных и мгновенных многократных переключениях. Обоснована применимость алгоритма для синтеза САТ, выполняющей оптимальную кусочно-постоянную аппроксимацию заданной непрерывной траектории. Решена задача оптимального по затратам топлива вывода спутника на геостационарную орбиту при ограниченном количестве включений двигателя и заданной продолжительности активной фазы полета.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Теоремы о достаточных условиях оптимальности сформулированы и доказаны для задач «со свободным правым концом» без фазовых ограничений, хотя на самом деле они остаются справедливыми практически без изменения и для общей постановки.

2. В алгоритме учитываются ограничения на правый конец траектории, но примеров применения алгоритма к таким задачам, пусть даже модельным, в диссертации нет.

3. Для оптимального и субоптимального алгоритмов синтеза САТ приводятся оценки объема требуемой памяти, которые дают также представление о количестве необходимых арифметических операций. Несмотря на то, что алгоритм оптимального синтеза не имеет методической погрешности, его численная реализация приводит к приближенному решению. Однако, в диссертации нет оценок точности получаемых решений по функционалу или по траектории.

4. Оценка количества переключений для задачи синтеза следящей САТ довольно грубая. Ее можно улучшать на каждой итерации, что может служить одним из признаков окончания итерационного процесса.

5. Во введении (стр. 11) приведена дискретная система в форме, отличной от используемой в цитируемых источниках. Следовало бы привести схему перехода от одной формы к другой.

6. В выводе 3 по главе 3 не согласованы падежи.

Сделанные замечания не портят общего хорошего впечатления о работе.

В целом, диссертация Коноваловой А.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на современном математическом уровне и внесшее значительный вклад в теорию оптимального управления дискретными системами автоматного типа. Основные результаты являются новыми и строго обоснованными. Они полностью опубликованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе и в научно-исследовательских институтах, специализирующихся в области авиационно-космической техники, механики, управления, например, МГТУ им. Н.Э.Баумана, МАИ, ФГУП "ГосНИИАС", Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт космических исследований РАН, Институт динамики систем и теории управления СО РАН.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника), а ее автор, Коновалова А.А., заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара ИЦ СА ИПС и кафедры системного анализа УГП им. А.К. Айламазяна (руководитель семинара – д.т.н., профессор Гурман В.И.).

Главный научный сотрудник ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,

д. ф.-м.н.



И.В. Расина