

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Ананьевского Игоря Михайловича

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)

Диссертация А.А. Коноваловой посвящена развитию методов исследования задач управления для динамических систем автоматного типа. Такого рода системы являются составной частью систем автоматического управления современных летательных аппаратов, транспортных средств, многих технологических объектов. Поскольку такие сложные технических системы имеют, как правило, несколько режимов работы, то для описания их динамики используются математические модели, представляющие собой системы с переключениями, то есть содержащие автоматную часть. Чаще всего автоматная часть располагается наверху в иерархической структуре управления объектом и отвечает за переключение между различными режимами функционирования системы. Применение оптимальных и субоптимальных методов управления системами автоматного типа позволяет существенно повысить эффективность работы сложных технических систем. Более того, знание максимальных возможностей управления может быть использовано на стадии проектирования с целью создания наиболее надежных и производительных систем. Поэтому актуальность темы, выбранной А.А. Коноваловой для диссертации, не вызывает сомнений.

Эта актуальность объясняет огромный интерес исследователей к задачам управления динамическими системами, которые могут быть охарактеризованы как системы с переключениями. К таким системам можно отнести системы с аппаратной структурой, логико-динамические, дискретно-непрерывные и другие – современная терминология позволяет включить в этот класс широкий спектр управляемых объектов. Автор сосредоточил свое внимание на аппаратной части системы – на той части, которая отвечает за переключения, то есть за поведение системы в моменты времени, когда происходит скачкообразное изменение ее состояния. В современной научной литературе наиболее близкими по описанию изучаемых классов объектов и методам исследований являются дискретные системы.

Перечислю основные особенности систем управления, изучаемых в представленной к защите работе, в том числе такие, которые отличают ее от множества других работ, посвященных задачам управления дискретными системами. В классической модели дис-



кретной системы происходит изменение состояние системы в дискретные, заранее известные, моменты времени (эти моменты времени называются тактовыми). Если рассмотреть такую систему в непрерывном времени, то ее траектория представляет собой кусочно-постоянную функцию. Динамика системы описывается рекуррентными соотношениями, причем правая часть системы зависит от управляющего параметра, который задается с помощью теоретико-множественной операции включения. В диссертации также правая часть системы изменяется в дискретные моменты времени, а управляющая величина задается с помощью включения, однако тактовые моменты не заданы и их выбор подлежит оптимизации. Поскольку считается, что в остальное время управление принимает значение, равное нейтральному элементу, то есть значение, при котором правая часть системы не изменяется, то допустимые траектории системы также кусочно-постоянны.

Так как динамика системы изучается на фиксированном конечном промежутке времени, то в классических дискретных системах число тактовых моментов заранее известно. В диссертации тактовые моменты не только произвольны, но и их число не задано и может быть, вообще говоря, сколь угодно велико.

В научной литературе встречаются немногочисленные исследования, посвященные задачам оптимального управления, аналогичным рассматриваемым в работе. В частности, в трудах научного руководителя диссертанта изучались системы автоматного типа, правая часть которых задается с помощью включения. Это означает, что скачки функции, описывающей состояние системы, могут рассматриваться в качестве управления. В диссертации скачки состояния системы зависят от управляющего параметра, выбор которого ограничен включением и от которого зависит функционал качества процесса управления. Данное обстоятельство позволяет расценивать проведенное исследование как новый шаг и существенное продвижение в развитии методов управления системами с переключениями, в частности, системами автоматного типа.

Перейду к общей оценке диссертации и анализу ее содержания последовательно по главам.

Диссертация состоит из введения, трех глав и списка литературы, насчитывающего 124 наименований. Во введении дано описание основного предмета исследований – управляемых динамических систем автоматного типа. Указано место, которое занимают эти системы в ряду более широкого класса динамических систем с переключениями. Дан краткий экскурс в историю изучения таких систем, приведена наиболее употребительная в настоящее время терминология в данной области. Даны характеристика состояния исследований и обзор основных существующих в литературе подходов. Затем сформулированы цели исследования и кратко описано содержание по главам. Автор подчеркивает важную особенность рассматриваемых задач управления, которая состоит в том, что возникающие оптимальные траектории в некоторые тактовые моменты могут иметь несколько мгновенных переключений. В диссертации такие траектории называются траекториями с многократными переключениями.

Первая глава посвящена оптимальным процессам с однократными переключениями.



В ней рассматривается задача оптимального управления системами автоматного типа с кусочно-постоянными траекториями, имеющими конечное число точек разрыва. Дана строгая постановка задачи оптимального программного управления для траекторий с однократными переключениями, которая состоит в том, чтобы найти оптимальный допустимый процесс, доставляющий минимум заданному функционалу, либо, если такого процесса не существует, то построить минимизирующую последовательность процессов. При этом может рассматриваться как задача со свободным концом, так и с терминальным условием. Сформулирована аналогичная задача оптимального позиционного управления, то есть управления в форме обратной связи. Затем вводятся понятия функции цены и функции условной цены. С помощью этих понятий формулируются в виде теорем, а затем доказываются достаточные условия оптимальности и для программного, и для позиционного управления. Как простое следствие доказанных утверждений получено достаточное условие оптимальности позиционного управления при ограниченном числе переключений. Ограниченность числа переключений может быть постулирована в исходной постановке задачи, либо возникает при некоторых условиях на «штрафы» за переключения. Эти штрафы учитываются в минимизируемом функционале.

Затем автор формулирует алгоритм синтеза оптимального позиционного управления, для обоснования которого используются полученные ранее достаточные условия. Для иллюстрации работоспособности алгоритма приведены два модельных примера его применения. Еще одним примером, подтверждающим эффективность предложенного подхода, служит задача об аппроксимации непрерывной функции кусочно-постоянной, в которой критерием качества аппроксимации служит сумма  $l_p$ -нормы разности функций и штрафов за скачки.

В заключение первой главы установлена связь между необходимыми и достаточными условиями оптимальности.

Вторая глава посвящена оптимальным процессам с многократными переключениями. В ней также рассматривается задача оптимального управления системами автоматного типа, однако условия, исключающие появление оптимальных траекторий с мгновенными многократными переключениями, снимаются. Вводится понятие кусочно-постоянных функций с многозначными точками разрыва и такие функции используются для описания допустимых процессов с мгновенными многократными переключениями. Ставятся задачи оптимального программного и позиционного управления, аналогичные изученным в главе 1 соответствующим задачам для траекторий с однократными переключениями. Результаты, полученные в главе 1 и представляющие собой достаточные условия оптимальности, обобщаются на случай процессов с многократными переключениями. Алгоритм синтеза оптимального позиционного управления, сформулированный в главе 1, также переносится на системы с многократными переключениями. Завершают вторую главу два численных примера применения этого алгоритма для решения модельных задач оптимального управления.

В третьей главе разработанный диссертантом подход применяется для решения зада-



чи оптимального управления динамической системой с автоматной частью. Рассматривается важная с прикладной точки зрения задача об оптимальном выводе спутника на геостационарную орбиту при наличии ограничений на количество включений двигателя. Такое ограничение является естественным и принимается во внимание на практике, в частности потому, что каждое включение двигателя приводит к неэффективному расходу топлива. В диссертации исследованы режимы полета, допускающие не более девяти включений двигателя в течение суток. Минимизируемым функционалом служит расход топлива. С помощью установленных автором в первой главе необходимых условий оптимальности задача сводится к задаче минимизации функции конечного числа переменных. В диссертации найдены оптимальные моменты включения и выключения двигателя, определен минимальный расход топлива, вычислены параметры возникающих орбит. Проведен сравнительный анализ полученных результатов со штатной схемой, применяемой на практике.

В заключении автором сформулированы основные положения диссертации, выносимые автором на защиту.

По моему мнению, диссертация А.А. Коноваловой представляет собой завершенную работу, выполненную на высоком научном уровне. Ее отличает хороший язык, математическая строгость, полнота и подробность изложения материала.

Проведенное исследование вносит вклад в теорию оптимального управления дискретными и дискретно-непрерывными системами, однако оно имеет не только теоретическое значение. Как показывают результаты, представленные в главе 3, предложенные в диссертации методы могут найти применение на практике при расчете оптимальных процессов в конкретных технических системах, в частности, при исследовании динамики космических аппаратов и траекторных задач для них.

Достоверность вынесенных на защиту результатов обусловлена математической строгостью постановок задач, сформулированных утверждений и представленных доказательств. Приведенные в работе примеры подтверждают эффективность разработанных методов решения задач оптимального управления системами автоматного типа.

Полученные автором результаты являются новыми. Они опубликованы в журналах списка ВАК, а также неоднократно докладывались на научных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По работе имеются следующие замечания.

1. Автор считает, что рассматриваемые в работе задачи следует отнести к вариационным задачам, поскольку речь идет о минимизации в функциональном пространстве. Такое утверждение небесспорно. На мой взгляд, они являются все-таки задачами конечномерной оптимизации.

2. Автор характеризует используемый им подход как распространение подхода В.Ф. Кротова на системы автоматного типа. По моему мнению, в диссертации используется метод динамического программирования Беллмана. Именно этот метод применяется для доказательства достаточных условий оптимальности позиционного управления и на нем

же основан алгоритм синтеза оптимальной оптимального управления.

3. Утверждение леммы 1.1 носит тривиальный характер и вряд ли заслуживает оформления в виде отдельной леммы.

4. Задача, рассмотренная в разделе 1.5, служит удачным примером применения разработанной методики и поэтому весьма интересна с математической точки зрения. Однако совершенно не ясно, стоит ли за ней какой-либо физический смысл, а название “синтез позиционного управления следящей системой” и вовсе сбивает с толку. Следящая система управления – это система автоматического управления, в которой управляемая величина воспроизводит произвольно изменяющееся задающее воздействие. В следящих системах управляющее воздействие заранее не может быть установлено, так как источником сигнала служит внешнее явление, закон изменения которого заранее неизвестен. В приведенном примере аппроксимируемая функция известна заранее.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации А.А. Коноваловой.

Считаю, что диссертация “Достаточные условия оптимальности управления дискретными системами автоматного типа” удовлетворяет требованиям Положения ВАК России о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Коновалова Анна Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника).

Заведующий лабораторией ИПМех РАН  
доктор физико-математических наук, профессор

И. М. Анапьевский

Подпись И. М. Анапьевского заверяю  
Ученый секретарь ИПМех РАН  
к.ф.-м.н. Е.Я. Сысоева

10.03.2015



ИПМех РАН

просп. Вернадского 101, корп. 1, Москва, 119526 Россия

Тел.: (495) 434-00-17 Факс: (499) 739-95-31, e-mail: ipm@ipmnet.ru