

ВВЕДЕНИЕ

Необозримо широкий круг самых разнообразных и в то же время наиболее сложных и ответственных задач управления в области техники и экономики, биологии и демографии, физики и микромира, т.е. буквально во всех сферах человеческой деятельности, характеризуется явно выраженной *пространственной распределенностью управляемых величин и управляющих воздействий*, без учета которой оказывается невозможным обеспечить требуемую степень адекватности создаваемых моделей исследуемым явлениям.

В силу этого принципиально важного, отличающегося глубокой спецификой обстоятельства подобные задачи должны рассматриваться в рамках *современной теории управления системами с распределенными параметрами (СРП)*, основы которой были созданы работами профессора А.Г.Бутковского в 60-70 годах прошлого века [12-18].

Центральное место в арсенале средств исследования СРП занимают *методы оптимального управления*, степень развития которых к настоящему времени доведена до уровня, позволяющего получить конкретные исчерпывающие результаты при решении представляющих большой самостоятельный интерес задач оптимизации СРП применительно к широкому кругу различных предметных областей.

Тем самым созданы достаточные предпосылки для непосредственного использования в инженерной практике этих методов, безусловная целесообразность применения которых определяется их большими потенциальными возможностями, несомненной эффективностью и отсутствием конкурентоспособных альтернатив в целом ряде ситуаций.

Серьезным препятствием на пути реализации этих возможностей являются отсутствие базового образования в данной области при подготовке специалистов соответствующих профилей в большинстве технических вузов страны; сложность привлекаемого математического аппарата, в значительной степени выходящего за рамки стандартных учебных программ для технических специальностей; высокие требования к степени владения таким аппаратом, предполагающие умение пользователя самостоятельно формулировать необходимые модификации известных результатов применительно к широкому кругу возможных вариантов различных постановочных аспектов и решать нестандартные задачи творческого характера по доводке общих алгоритмов оптимизации до конкретных инженерных решений.

В связи со сказанным существует острая потребность в создании учебника для первоначального изучения основ теории оптимального управления СРП, рассчитанного на стандартный уровень подготовки читателя, сохраняющего в то же время на «физическом уровне строгости» необходимую степень полноты, общности и обоснованности базовых результатов и содержащего необходимый арсенал средств вычислительной

технологии, наглядно демонстрирующих эффективность практического применения современных методов оптимизации поведения объектов с распределенными параметрами (ОРП).

В существующей учебной литературе указанный круг вопросов освещен совершенно недостаточно.

Настоящее учебное пособие, являющееся одним из первых в указанном направлении и призванное в какой-то мере восполнить этот пробел, ставит своей целью систематическое изложение с указанных позиций основных методов построения программных оптимальных управлений и синтеза оптимальных регуляторов для ОРП.

При изучении пособия не требуется специальная подготовка за пределами обычных курсов высшей математики и теории управления для студентов, обучающихся по инженерным специальностям и по двухуровневой системе подготовки бакалавров и магистров в рамках направлений «Автоматизация и управление» и «Управление в технических системах».

Данное пособие является третьей, заключительной частью учебного курса «Введение в теорию управления системами с распределенными параметрами», которую следует рассматривать как непосредственное продолжение книг автора «Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами [62] и «Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами [63].

В первой главе формулируется содержательная постановка задачи оптимального управления (ЗОУ) распределенными объектами и приводится общая характеристика основных методов их решения.

Вторая глава в целях обеспечения замкнутого характера изложения, получения возможных наглядных аналогий с сосредоточенными системами при последующем обосновании подобных теоретических схем и для удобства читателей посвящена краткому описанию принципа максимума Понтрягина (ПМП), соответствующие обобщения которого являются одной из основных форм условий оптимальности для ОРП. Приводятся формулировка и некоторые схемы обоснования ПМП, идеологически родственные с аналогичными доказательствами в задачах оптимизации распределенных объектов. Анализируются возможности практического применения ПМП при оптимальном управлении сосредоточенными объектами. Показывается, что аппарат ПМП непосредственно распространяется на задачи оптимизации стационарных состояний ОРП.

Третья глава содержит систематическое изложение основных вариантов принципа максимума, выступающих в качестве базовых условий оптимальности в системах с распределенными параметрами, и способов построения на этой основе алгоритмов программного оптимального управления применительно к типовым моделям ОРП. Показаны возможности прямого распространения ПМП на задачи управления распределенными объектами, описываемыми системами обыкновенных дифференциальных уравнений в бесконечномерном пространстве состояний. Формулируется

и обосновывается принцип максимума для широкого класса моделей СРП, представляемых уравнениями в частных производных.

Рассматривается отличающийся рядом преимуществ принцип максимума А.Г.Бутковского для задач управления распределенными системами, моделируемыми интегральными вход-выходными соотношениями. Приводится ряд примеров, иллюстрирующих возможности практического использования аппарата этих условий оптимальности для конкретного решения стандартных задач оптимального управления типовыми ОРП.

В четвертой главе изучается эффективный аппарат метода моментов, распространение которого на задачи оптимизации СРП обосновано в работах А.Г.Бутковского. Описываются основные свойства оптимальных решений и общие вычислительные процедуры /-проблемы моментов, к которой сводится целый ряд задач оптимального управления с фиксированным конечным состоянием управляемого объекта.

Анализируются возможности применения метода моментов в задачах оптимального управления типовыми моделями параболических и колебательных ОРП с сосредоточенными и распределенными управляющими воздействиями. Приводятся некоторые способы решения нелинейной проблемы моментов в задачах с подвижными управлениями.

В пятой главе рассматриваются некоторые численные методы решения ЗОУ ОРП. Дается их общая характеристика и более подробное описание наиболее распространенного на практике метода вариаций в пространстве управлений.

Шестая глава посвящена изложению разработанного автором точного метода решения краевых задач оптимального управления ОРП в условиях заданных допусков на отклонение от требуемого конечного состояния управляемой системы. Получаемые результаты общего характера иллюстрируются на примерах оптимизации нестационарных процессов теплопроводности.

В седьмой главе исследуется основной круг вопросов, связанных с аналитическим конструированием оптимальных регуляторов ОРП в типовых линейно-квадратичных задачах оптимизации. Анализ проводится на основе метода динамического программирования для систем с распределенными параметрами. Процедуры синтеза оптимальных управлений рассматриваются при полном и неполном измерении состояния для различных видов управляющих воздействий типовых моделей объектов параболического типа. Рассматриваются способы построения оптимальных систем модального управления ОРП.

Технике построения оптимальных и квазиоптимальных по быстродействию систем управления распределенными объектами посвящается заключительная восьмая глава книги.

Необходимость изложения обширного материала, отражающего основные закономерности процессов оптимального управления СРП в предельно упрощенной и доступной, но в то же время достаточно полной и

содержащей необходимые обоснования форме, создает очень трудную проблему выстраивания приоритетов, которая стояла перед автором при написании этого пособия.

С одной стороны, в книге приводится в «готовом» виде целый ряд достаточно общих результатов теории оптимального управления СРП, алгоритмов оптимизации и вычислительных процедур, обеспечивающих в комплексе возможности их непосредственного использования в конкретных приложениях применительно к рассматриваемым расчетным схемам. В то же время высокий уровень сложности природы исследуемых закономерностей неизбежно приводит к сложной форме их математического описания, требующей глубокого понимания смыслового содержания соответствующих модельных представлений, без которого становится невозможным корректное применение указанных результатов, в том числе в многочисленных приложениях с модифицированными постановочными аспектами по отношению к вариантам, рассмотренным в пособии. Такое понимание достигается лишь с осознанием причинно-следственных связей между исходными данными задачи управления СРП и формулируемыми свойствами ее оптимальных решений. Поэтому в книге приводятся не претендующие на строгость, но достаточно наглядные схемы обоснования всех основных положений и выводов, как раз в форме, опускающей детали и подчеркивающей идейную сторону вопроса. Эти обоснования выделены в тексте книги мелким шрифтом и могут быть при изучении пособия опущены в первом чтении. Заинтересованный читатель может ознакомиться со строгими доказательствами, опубликованными в указанных в книге литературных источниках.

С другой стороны, в учебном пособии уделяется большое внимание содержательным оценкам рассматриваемых построений, анализу с этих позиций изучаемого алгоритмического обеспечения и средств вычислительной технологии, практической интерпретации получаемых выводов и рекомендаций и их связям с реальными инженерными проблемами. В книге приводится большое число подробно разбираемых примеров, непосредственно демонстрирующих возможности современных методов оптимизации СРП и представляющих самостоятельный интерес для приложений в соответствующих предметных областях.

В учебном пособии, предназначенном в первую очередь для первоначального систематического изучения основ теории оптимального управления СРП, рассмотрены лишь наиболее характерные задачи оптимизации в детерминированной постановке применительно в основном к линейным математическим моделям типовых объектов с распределенными параметрами, отражающие тем не менее основные качественные свойства широкого круга исследуемых процессов.

Приводимый список литературы ни в коей мере не претендует на полноту и содержит лишь те опубликованные работы, которые использо-

вались при написании данного пособия и с помощью которых читатель может получить более глубокую подготовку в рассматриваемой области.

Все условные обозначения, кроме вводимых вновь, соответствуют принятым в предыдущих частях курса [62, 63].

Инициатором написания этой книги, как и двух предыдущих, является основоположник современной теории управления СРП Анатолий Григорьевич Бутковский. Автор искренне благодарен А.Г.Бутковскому за исключительно ценные замечания, советы, рекомендации и многолетнюю неизменную поддержку, роль которых в создании данного учебного курса невозможно переоценить.

Автор искренне признателен всем своим сотрудникам и коллегам по работе за заинтересованное обсуждение материалов книги и конкретную помощь в подготовке к ее изданию.

Автор считает своим приятным долгом отдельно выразить благодарность И.Г.Минаковой и студенту магистратуры А.Ю.Лойко за огромный труд по подготовке рукописи к печати.

Автор с благодарностью примет замечания и поправки, которые сочтут возможным указать читатели, прислав их в издательство или в Самарский государственный технический университет.