

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория автоматического регулирования начала формироваться как самостоятельная научная дисциплина в 30-40 годы XIX века на основе отдельных направлений теоретической механики для решения конкретных технических задач. Главным объектом исследования в этот период были автоматические регуляторы производственных процессов, такие как регулятор Уатта для паровой машины. Успехи в деле конструирования и построения регуляторов и развивающейся теории малых колебаний послужили основой для развития теории регулирования [50, 63]. Было введено важнейшее понятие устойчивости регулируемого процесса, и получены первые критерии устойчивости линейных систем (Д.К. Максвелл, Э. Раус, И.А. Вышнеградский, А. Гурвиц, А. Стодола, Н.Е. Жуковский). В работах А.М. Ляпунова [46] впервые появилось математически строгое определение понятия устойчивости, были получены первые результаты по устойчивости нелинейных систем, опирающиеся на фундаментальную идею введения функций Ляпунова.

В 30-е годы прошлого века с появлением телефонии и радиосвязи основным аппаратом теории становятся частотные методы и соответствующие частотные критерии устойчивости (Г. Найквист, Ф.А. Михайлов). Первые теоретические методы анализа системы автоматического регулирования опирались на работы Г. Боде, Г. Найквиста, В.В. Солодовникова [63]. В частности, такие понятия, как частотная характеристика, ширина пропускания, усиление (в децибелах) и запас фазы

Предисловие

использовали для проектирования систем в частотной области, основываясь на способе проб и ошибок, что послужило началом инженерных методов современной теории управления.

Если до второй мировой войны проектирование систем управления представляло собой искусство, то в период второй мировой войны и до начала 50-х годов стала быстро развиваться теория автоматического регулирования. В это время широко применялись временные критерии, такие как время нарастания, время переходного процесса, максимум относительного перерегулирования. Метод корневого годографа (У. Эванс, К.Ф. Теодорчик) явился связующим началом между методами анализа и синтеза во временной и частотной областях и представляет собой достаточно мощный аналитический инструмент исследования. В течение этого периода инженер, занимающийся проектированием регуляторов, имел дело с проектированием линейных следящих систем. Небольшими нелинейностями объекта и усилителя мощности можно было пренебречь, так как отрицательная обратная связь делала характеристики системы нечувствительными к изменениям параметров и возмущениям.

Технический прогресс промышленного производства и исследования космоса, которые начались в середине прошлого века, пробудили интерес как к системам с исключительно высокой точностью и требованиям разумного использования ресурсов, так и к нелинейным системам управления, в частности к релейным. Для анализа систем управления с релейными устройствами было предложено два метода: описывающей функции (метод гармонического баланса Крылова-Боголюбова) и фазового пространства (А.А. Андронов, С.Э. Хайкин). Метод гармонического баланса позволяет инженеру исследовать устойчивость замкнутой нелинейной системы с частотной точки зрения, а метод фазового пространства – проектировать нелинейные системы во временной области.

Предисловие

В середине 20-го столетия к исследованию нелинейных систем управления стали привлекаться методы функционального анализа. Идейной основой метода функциональных рядов была работа М.Р. Фреше – французского математика, опубликованная в 1950 году. В работах Н.Д. Егупова, К.А. Пупкова, В.И. Капалина функциональные ряды Вольтера стали использоваться при исследовании динамических нелинейных систем управления [55, 56].

Проблема оптимального по времени управления интенсивно изучалась математиками СССР и США. В 1953-1957 годы происходит интенсивное использование методов вариационного исчисления к решению задач оптимального управления. Это привело к разработке принципа максимума Понтрягина (Л.С. Понтрягин, В.Б. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко) [54] и динамического программирования (Р. Беллман) [14, 15]. Принцип максимума Понтрягина установил необходимое условие первого порядка для сильного минимума для задач оптимального управления с наличием ограничений на управляющие воздействия, обобщающее уравнение Эйлера и условие Вейерштрасса вместе взятые. Принцип Понтрягина можно рассматривать как способ подхода к вариационным задачам Гамильтона, а метод динамического программирования Беллмана следует рассматривать как направление, идущее по пути Гамильтона-Якоби. Работы специалистов по управлению (М. Атанс, Р. Калман, М. Фалб, Н.Н. Моисеев, А.М. Летов, Н.Н. Красовский, А.А. Красовский, А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, Ф.Л. Черноушко, С.В. Емельянов) помогли инженерам осознать важность и эффективность созданной теории оптимального управления.

Основным методом синтеза оптимальных систем является метод аналитического конструирования. Термин *«аналитическое конструирование»*, подразумевающий синтез оптимальных систем управления, основанный на минимизации функционала качества, был введен

Предисловие

советским ученым Александром Михайловичем Летовым (1911-1974). Метод А.М. Летова разрабатывался вначале на основе применения классического вариационного исчисления [44, 45]. Однако в настоящее время термином «аналитическое конструирование» можно объединить все методы синтеза систем как детерминированных, так и стохастических с полной информацией о параметрах, состоянии и возмущениях, т.е. все методы, позволяющие применять аналитические методы для исследования разнообразных задач оптимального управления и оценивания [40]. Этот метод разработан как для детерминированных, так и для стохастических систем и позволяет на стадии проектирования синтезировать условия (параметры и управления), при которых система будет выполнять поставленную задачу наилучшим образом с позиции заданного функционала качества, другими словами, позволяет синтезировать оптимальную систему.

В большинстве методов аналитического конструирования оптимальных систем рассматриваются задачи во временной области с использованием понятия состояния системы и теории матриц. В общих чертах основной подход к проблеме выглядит следующим образом:

1. определить динамические характеристики объекта в форме дифференциальных уравнений или уравнений в конечных разностях;
2. определить множества допустимых траекторий системы и управлений (ограничения на координаты состояния, управляющие воздействия, задаваемые в виде равенств или неравенств);
3. задать цели управления;
4. задать функцию потерь или функционал качества.

Задачей конструирования оптимальной динамической системы управления с полной информацией по отношению к множеству целей, функционалу качества, множеству допустимых управлений, множеству состояний и начальному состоянию объекта в момент начала управления является отыскание управления, принадлежащего допустимому множеству

Предисловие

управлений, минимизирующего заданный функционал качества на решениях уравнения объекта.

Синтез оптимальной системы управления осуществляется с использованием необходимых и достаточных условий минимума функционала качества. Следует отметить, что существование оптимального управления не является необходимым: во множестве допустимых управлений может вообще не оказаться управлений, переводящих объект из начального состояния в заданное множество целей.

Таким образом, применение аналитических методов конструирования требует знания всей информации об объекте, внешней среде и процессах, протекающих внутри системы, т.е. применение аналитических методов конструирования возможно в условиях полной информации. Главное же преимущество аналитических методов заключается в том, что если решение получено, то решен целый класс задач, а не одна специфическая. Именно это свойство придает аналитическим методам большое теоретическое значение.

Сложность большого количества современных систем управления зачастую не позволяет получить заранее полное описание процессов, протекающих внутри системы, и ее взаимодействия со средой. Достаточно часто математическая модель системы управления учитывает лишь допустимые области изменения параметров управляемой системы и характеристик ее отдельных элементов без конкретизации самих этих параметров и характеристик. Указанные области могут определяться, например, интервальными ограничениями, соответствующими заданным техническим допущениям на систему.

Применение аналитических методов для нестационарных систем управления с неполной информацией о параметрах, входных воздействиях, помехах либо сопряжено с большими вычислительными трудностями, либо не представляется возможным (как в случае синтеза оптимальной системы). Поэтому правомерен подход к конструированию таких систем, основанный

Предисловие

на использовании дополнительных цепей, на которые возлагаются задачи оптимизации системы в смысле выбранного критерия качества в процессе работы системы и по мере накопления и обработки необходимой для этих целей информации.

Метод, основанный на указанном подходе, можно объединить общим названием – *алгоритмическое конструирование* нестационарных систем управления. Термин «алгоритмическое конструирование» был введен советским ученым Борисом Николаевичем Петровым (1913 -1980).

Задачей конструирования динамической системы с оптимизацией (в случае неполной информации о параметрах объекта и его взаимодействия со средой) по отношению к множеству целей, функционалу качества, множеству допустимых управлений, множеству состояний и начальному состоянию объекта в момент начала управления является отыскание координатно-параметрического управления, принадлежащего допустимым множествам управляющих координатных и параметрических воздействий, минимизирующих заданный функционал качества на решениях уравнения системы по мере накопления и обработки необходимой и соответствующей информации.

Существование координатно-параметрического управления, оптимизирующего систему с неполной информацией, не является необходимым: а) начальные условия объекта, начальная и/или текущая неопределенность, длительность интервала управления системой могут оказаться такими, что процесс оптимизации может быть не закончен, т.е. пере
страиваемые параметры за время управления системой могут не достичь значений, при которых функционал качества достигает минимального значения; б) во множествах допустимых управляющих координатных и/или параметрических воздействий может вообще не оказаться управлений, переводящих объект из начального состояния в заданное множество целей.

Предисловие

Таким образом, если с помощью методов аналитического конструирования можно на стадии проектирования создавать оптимальную систему, то с помощью методов алгоритмического конструирования можно создавать систему, снабженную дополнительными цепями, с помощью которых система в процессе функционирования и обработки необходимой и соответствующей информации будет оптимизировать свою работу.

Отметим, что применять методы алгоритмического конструирования, основанные на возможности параметрической оптимизации нестационарной системы, в ряде случаев, с позиции технической реализации, не является рациональным или не представляется возможным.

В связи с этим возникает задача построения управления не для одной конкретной, точно заданной системы, а целого семейства систем, параметры и характеристики элементов которых принадлежат заранее известным множествам. В современной литературе по теории управления соответствующая проблема получила название задачи *робастного управления*. Существует несколько определений робастного управления, в которых, так или иначе, отражается существо постановки задачи управления нестационарным объектом.

Задачей конструирования робастной динамической системы по отношению к множеству целей, множеству допустимых управлений, множеству состояний и начальному состоянию объекта в момент начала управления и множеству возможных значений параметров и характеристик элементов объекта является отыскание (в соответствии с заданным функционалом качества) управления, принадлежащего допустимому множеству управляющих воздействий, обеспечивающего перевод системы из начального состояния в заданное множество целей при любых значениях параметров и характеристик элементов объекта, принадлежащих множеству возможных значений.

Предисловие

По существу, задача робастного управления может быть отнесена к задачам аналитического конструирования, так как для ее решения используется известная информация о допустимых областях изменения параметров

управляемой системы и характеристик ее отдельных элементов без конкретизации самих этих параметров, и характеристик.

Отметим, что теория робастного управления только еще формируется и основные результаты получены для анализа робастной устойчивости и робастной стабилизации линейных объектов. При анализе робастной устойчивости исследуется не одна заданная линейная система, а устойчивость целого семейства систем, соответствующих исходной (номинальной) системе при наличии неопределенности. Задачи управления, как правило, сводятся к задачам стабилизации. Этим и объясняется применение для решения таких задач классических методов, которые основаны на использовании теории матриц и передаточных функций (комплексных коэффициентов усиления) [20,43,56]. Использование этих методов для синтеза управляющих воздействий для нестационарных систем при заданном интервале управления невозможно.

Существование робастного управления не является необходимым (из самого его определения).

Критическое отношение к методам синтеза оптимального управления, базирующегося на применении пространства состояния в условиях адекватности математической модели реальному объекту, вызвало ревизию теории управления 1970-х годов. В инженерной практике происходит возврат к классическим способам регулирования с помощью простых регуляторов (типа ПИД) и к простым методам их настройки. В теории восстанавливается интерес к частотным методам, которые обобщаются на случай многомерных систем (Г. Розенброк). С 1980-х годов формируется новая теория, так называемая H_∞ -теория (Г. Зеймс, В.А. Френсис, Дж. С. Дойл, К. Гловер)

Предисловие

[81], которая позволила объединить частотные методы и методы пространства состояний и по-новому ставить оптимизационные задачи. Эта же постановка позволила рассматривать задачи робастного управления.

Задача выбора оптимального управления при неполной информации о параметрах системы и действующих возмущениях может быть сформулирована как игровая задача, и оптимальная стратегия управления определяется как стратегия, гарантирующая достижения заданной цели при наиболее неблагоприятных сочетаниях неопределенных факторов.

Задачей конструирования динамической системы с гарантирующим управлением по отношению к множеству целей, функционалу качества, множеству допустимых управлений, множеству состояний, начальному состоянию объекта в момент начала управления и множеству возможных значений параметров и характеристик элементов объекта является отыскание управления, принадлежащего допустимому множеству управляющих воздействий, минимизирующего заданный функционал при наименее благо приятных значениях параметров и действующих возмущений и обеспечивающего перевод системы из начального состояния в заданное множество целей при любых возмущениях, принадлежащих заданному множеству.

Данная книга подготовлена на основе лекций, читаемых в течение ряда лет в рамках курса «Теория управления» студентам департамента прикладной математики Национального Исследовательского Университета «Высшая школа экономики», однако изучение изложенного материала будет полезно студентам и аспирантам других факультетов, а также специалистам, работающим в области управления разнообразными системами.

Содержание книги является развитием отдельных глав книги «Математическая теория конструирования систем управления» (В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов) [5], а также дополнением новых разделов теории управления, появившихся в последнее десятилетие.

Предисловие

Автор пользуется возможностью выразить благодарность коллективу кафедры кибернетики Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по совместным работам, в том числе К.А. Пупкову, В.Д. Фурасову, Прокопову Б.И., С.Н. Маркову, В.И. Капалину, А.Н. Данилиной, А.В. Белову, С.Е. Бузникову и многим другим, с кем удалось работать в институте на протяжении многих лет. Благодарим так же С.Н. Васильева, Б.В. Павлова, И.Б. Ядыкина, А.П. Кордюкова и многих других сотрудников Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук за внимательное прочтение книги и за замечания, ценные советы и полезную критику по содержанию книги. Автор благодарит О.Г. Андрианову за внимательное почтение рукописи и замечания.

Автор будет признателен за любые конструктивные замечания по содержанию книги.