

ББК 22.18я73

А 51

Алпатов Ю. Н.

А 51 Структурно-параметрический синтез многосвязных систем управления: Монография. — 2-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2019. — 288 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3058-1

В монографии рассматриваются вопросы анализа и синтеза при динамическом проектировании многосвязных систем управления. Совершенствование методов формализованного синтеза строится методом системного анализа топологической модели разработанного С-графа. Предложенные методы композиции и декомпозиции структурных компонентов систем позволяют осуществить синтез системы на различных этапах проектирования. Рассмотрены этапы формализованного синтеза многосвязных систем для важных задач народного хозяйства.

Монография предназначена студентам вузов, обучающимся по направлениям подготовки: «Прикладная математика», «Прикладная математика и информатика», «Прикладная информатика», «Управление в технических системах». Книга также будет полезна для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и внедрением систем управления сложными процессами.

ББК 22.18я73

Рецензенты:

Ю. Ф. МУХОПАД — доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, академик РАЕ, Академии космонавтики им. Э. Цюлковского, РАИН, заслуженный деятель науки РФ;
В. Н. СИЗЫХ — доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2019

© Ю. Н. Алпатов, 2019

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2019

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Постановка задачи анализа и синтеза систем управления.....	11
1.1. Сущность задачи анализа и синтеза систем управления.....	11
1.2. Анализ методов синтеза систем управления.....	15
1.3. Основы метода анализа и синтеза систем.....	18
1.4. Модель системы управления, представленная С-графом.....	25
1.5. Метод синтеза одномерных систем управления.....	30
1.6. Синтез структуры многоконтурной системы управления.....	38
1.7. Синтез структуры многосвязной системы управления.....	45
1.8. Моделирование атмосферно-электрического поля.....	56
Глава 2. Синтез многомерных систем управления.....	68
2.1. Исследование функциональной связи параметров многомерных систем.....	68
2.2. Определение оптимальных параметров многомерной системы по заданному критерию.....	77
2.3. Синтез структуры многомерных систем управления.....	81
2.4. Выбор структуры многомерной системы управления.....	85
2.5. Синтез структуры и определение параметров перекрёстных связей в МОСАР.....	90
2.6. Методика проектирования многомерной системы.....	100
Глава 3. Синтез локальных компонентов систем управления методом структурных чисел.....	108
3.1. Структурные преобразования компонентов системы.....	108
3.2. Методика синтеза компонентов структурных чисел.....	117
3.3. Построение передаточной функции по формуле Мэзона в символьной форме.....	120
3.4. Алгоритмизация формулы Мэзона для определения передаточных функций.....	126
3.5. Синтез системы экстремального управления.....	129
Глава 4. Синтез компонентов структуры методом цепных дробей.....	136
4.1. Декомпозиция структуры с помощью цепных дробей.....	136
4.2. Представление коэффициентов элементарных звеньев в виде целочисленных значений величин.....	148
4.3. Методика синтеза систем управления.....	159
Глава 5. Идентификация многосвязных объектов в стационарном режиме.....	162
5.1. Принцип контроля состояния воздушного бассейна в промышленных зонах.....	162
5.2. Модель электростатического поля тропосферы в условиях антропогенного воздействия.....	168
5.3. Модель исследования качества прироста леса.....	171
5.3.1. Формализация изучения характеристик леса.....	171

5.3.2. Матричная форма представления модели.....	176
5.3.3. Идентификация лесного объекта с использованием программы S-graph.....	181
Глава 6. Структурный синтез многосвязных систем управления в динамическом режиме.....	188
6.1. Структурная идентификация процесса производства алюминия.....	188
6.2. Синтез алгоритмов управления процессом производства алюминия симплекс-методом.....	198
6.3. Метод оптимизации процесса управления по двум критериям при пересекающихся множествах параметров.....	200
6.4. Исследование динамических свойств объекта.....	208
6.4.1. Математическая модель анодного эффекта.....	208
6.4.2. Анализ устойчивости компонентов системы.....	218
6.4.3. Разложение дробно-рациональной функции на звенья первого и второго порядков.....	222
6.5. Разработка алгоритма управления процессом производства алюминия.....	231
6.6. Декомпозиция передаточных функций управления анодным эффектом с целочисленными значениями параметров.....	241
6.7. Алгоритм преобразования дробно-рациональной функции в цепную дробь.....	270
Заключение.....	280
Литература.....	281

Введение

Совершенствование способа производства в экономике во многом определяется сроками ввода в эксплуатацию новых технологических процессов и оборудования. Процесс разработки нового оборудования можно разбить на три неравнозначных этапа: разработка, изготовление, внедрение. Наибольшее время приходится затрачивать на этапе разработки нового оборудования, систем. Значительного прогресса в технике можно достигнуть путем широкого применения вычислительной техники для автоматизации научно-исследовательских и проектных работ. Эффективность использования вычислительной техники зависит от возможности формализованного представления поручаемых вычислительной технике работ. В области проектирования сложных систем управления производственными процессами наблюдается еще широкое использование неформализованного аппарата теории автоматических систем с целью получения промышленных систем, удовлетворяющих различному противоречивому множеству критериев. Повышение качества проектирования систем управления при одновременном сокращении сроков, стремление приблизить проектное решение к оптимальному и заставили рассмотреть возможность разработки новых математических методов для эффективного синтеза систем автоматического управления (САУ) с применением средств вычислительной техники.

Успех в автоматизированном проектировании зависит от уровня развития общей теории управления, приспособленности используемых методов к машинной реализации, алгоритмической и технической возможности вычислительной техники. Что касается двух последних факторов, то можно считать положение в этой области благополучным. Использование же теоретических и методологических основ в автоматизированном проектировании систем нуждается в существенной доработке методов. Наиболее многообещающим является создание новых методов, не только расширяющих и дополняющих возможности прежних, но и позволяющих получить решение задач в постановке, учитывающей специфику машинного проектирования и призванных автоматизировать этапы проектирования различных систем.

Использование вычислительной техники для проектирования сложных автоматических систем потребовало пересмотра сложившихся методов синтеза. Стремление к максимальной автоматизации проектных и исследовательских работ вызывает необходимость разработки совершенно новых методов синтеза САУ, специально ориентированных на использование ЭВМ.

В книге на единой основе системного анализа предлагается новый метод синтеза автоматических систем управления. В качестве единства основы

рассматривается определенная функциональная значимость компонента от его структурного расположения в системе. Исходя из этой посылки и была предложена методика формализованного представления системы управления, которая учитывает структуру проектируемой или гипотетической системы. С этой целью систематизируются и обобщаются результаты традиционных методов синтеза в теории автоматического регулирования, анализируются основные трудности и невозможность их формализации в самом общем виде, предлагается метод формализации любой системы с целью ее анализа и синтеза, композиция и декомпозиция компонентов до элементарных звеньев, а также определяются параметры каждого элемента структуры. Предлагаются возможности видоизменения методов для расширения области их применения. Созданные применительно к автоматическим системам, методы пригодны для использования в других областях научных исследований: электронике, механике, физике.

Описываемый в книге метод сопровождается примерами его применения.

Предлагаемый новый метод синтеза ни в коей мере не оспаривает достоинства и область применения существующих методов – графов, матриц, структурных схем. Он является попыткой в известной степени объединить с общих позиций и расширить возможность применения этих методов, что позволяет с системных позиций осуществлять формализованный синтез систем, значительно расширив возможности проектировщика в объективном принятии решений.

Возрастающий объем проектных работ при дефиците трудовых ресурсов и необходимости сокращения сроков проектирования заставляет решить в ближайшее время важную проблему – автоматизации проектирования во всех отраслях народного хозяйства.

Под автоматизацией проектирования понимают, во-первых, разработку специализированных технических средств, обеспечивающих ввод и вывод информации, а также разработку автоматизированных рабочих мест проектировщика, содержащих комплексы специального оборудования.

Во-вторых, автоматизация проектирования предполагает разработку специального математического обеспечения: математических методов, алгоритмов и программ.

Проектирование сложных многомерных многосвязных систем большой размерности является чрезвычайно трудной задачей, а необходимость проектирования подобных систем все время возрастает, так как после решения задачи автоматического управления отдельными объектами на очередь встала задача автоматического управления целыми комплексами объектов. Эти объ-

екты могут значительно отличаться друг от друга по своим динамическим характеристикам, физической и технической природе.

Примеров систем подобного рода можно привести достаточно много. Это могут быть сложные энергетические установки, системы управления сложными технологическими процессами и в целом предприятиями.

При проектировании «больших» или «сложных» систем очень важно применить единый метод для описания и представления систем в целом, отдельных объектов этих систем и отдельных составных частей объектов на различных иерархических уровнях.

Необходимость компактного описания систем потребовала применения или разработки новых методов, которые обладают должной наглядностью, возможностью структурных исследований, а также снижением трудоемкости при синтезе систем.

Эти обстоятельства заставляют продолжать поиски новых методов представления и исследования систем, которые сочетались бы с уже известными и были бы удобны для проведения аналитических исследований.

Традиционные методы слабо охватывают процесс формализации проектирования, в основном ориентированы на принятие решений проектировщиком, включают большой объем вычислительных операций и имеют низкую точность, что ограничивает применение их при синтезе сложных систем. Совершенствование традиционных методов или разработка новых в отрыве от специфики машинной реализации во многих случаях замедляет их полезное применение, снижает эффективность использования ЭВМ.

Современные системы управления включают широкое разнообразие физических компонентов и элементов, следовательно, математическая дисциплина, предназначенная для синтеза систем управления, должна охватывать системы различной физической природы. Такое формализованное представление о системах можно получить с помощью графов. Предпринимались попытки формализовать процесс синтеза, однако они были направлены на заимствование методов анализа систем и приспособление их для целей синтеза. Приемлемых же математических моделей, описывающих поведение сложных структурных схем, не было. В книге выявлен определенный изоморфизм пространства предметов (переменные системы и узлы графа) полю чисел (передаточные функции и ветви графа) при определенных операциях: сложение и скалярное умножение. Это обстоятельство послужило основой для вывода аналитических формул. На основе проведенной классификации множества вершин графа введено понятие структурного графа (С-графа). С-граф дает более полную картину структурной схемы системы, выделяя функционально основные структурные элементы. Это важное свойство

функционального значения звена в структурной схеме закладывается в математическую модель системы. Модель системы предложено записывать в матричной форме. Она состоит из матрицы входных компонентов графа–В, матрицы структуры–А и матрицы входных переменных $[X_{вх}]$. Однородное матричное уравнение системы полностью отражает функциональную зависимость компонентов в структуре и позволяет представить процесс получения уравнения системы из отдельных детерминированных простейших этапов анализа отдельных компонентов графа.

Исходное уравнение системы служит основой для предварительного анализа обоснованных требований к синтезу проектируемой системы. Полученные соотношения позволяют уточнить на этапе синтеза степень детализации по количеству выбранных компонентов. Предложенная методика позволяет определить допустимое число неизвестных компонентов и структуру этих компонентов. С целью значительного сокращения объема вычислительных операций предложено использование обобщенной формулы Гаусса для понижения порядка матриц [27, 58].

Иллюстрация примеров синтеза компонентов системы свидетельствует об эффективности метода, простоте реализации, формализованности самого процесса синтеза.

Работе многих систем управления (СУ) сложными процессами присуща явная связность, и синтез их возможен только на основе функционального связного взаимодействия. Поэтому на этапе проектирования необходимо выполнить системные исследования с целью обоснования технических требований к каждому компоненту связной системы. Математическая модель, учитывающая структурную принадлежность компонента, позволяет провести такой синтез.

Связность системы обеспечивается также введением дополнительно к существующим перекрестных связей. На основе проведенных исследований однотипных многосвязных систем автоматического регулирования (МСАР) показана целесообразность выбора места подключения дополнительных звеньев, обеспечивающих заданный режим работы связной системы. Предложена методика синтеза дополнительных связей. Если проектировщик имеет возможность переработать структуру отдельных каналов многосвязной системы, то открываются интересные возможности выбора оптимальных параметров всей многосвязной системы.

Исследованные три варианта перекрестных связей в МСАР позволяют проектировщику по выбору осуществить различную глубину связности в соответствии с проведенным системным исследованием. Допустимость осу-

ществления связности, а также инвариативности по видам воздействий дают возможность получить довольно гибкую систему.

Методика синтеза многосвязных систем принципиально распространяется на n -связность.

Полученные математические модели искомым компонентом иногда имеют очень сложное выражение в виде полинома m -й степени. Техническая реализация таких компонентов связана с большими трудностями. Это вызывает настоятельную необходимость разработки методов структурного синтеза найденных компонентов.

В книге предлагается метод представления синтезированного компонента системы в виде определенной структуры из элементарных звеньев. Синтез компонента проводится путем генерирования последовательно-параллельной структуры из m элементарных звеньев первого порядка. Для автоматизации этого процесса предложена матрица структуры C , по которой генерация структуры и вычисление формулы Мэсона в виде структурных чисел проводится довольно просто путем логического суммирования строк и столбцов матрицы C . Параметры элементарных звеньев находятся при решении нелинейной совместной системы коэффициентов передаточной функции компонентов из генерированной структуры.

Метод генерирования структуры целесообразно применять, если вообще структура всей системы неизвестна либо когда порядок передаточной функции компонента довольно высок. Высокая автоматизация процесса генерирования структуры компонента позволяет в короткое время пересмотреть все варианты и выбрать нужную. Следует отметить, что в алгоритм генерирования структуры можно включить блоки, которые могут учитывать различные технические требования, например, минимум дифференцирующих или интегрирующих звеньев, ограничение на параметры и др. Детерминированность процесса генерирования открывает широкие возможности пересмотра всех или большого числа вариантов структур.

Структуру синтезированного компонента можно получить, разлагая полином модели с помощью аппарата цепных дробей. В этом случае получим набор параллельных элементарных звеньев i -го или k -го порядка. Порядок элементарного звена выбирается проектировщиком.

Использование аппарата цепных дробей значительно расширило возможности выбора структур компонентов.

Таким образом, в работе изложен новый метод структурного синтеза сложных многомерных многосвязных систем, дающий возможность более полного использования матричной записи уравнения системы и повышающий информативные свойства, заложенные в структуре системы. По мнению

автора, преимуществом предлагаемого метода перед методами над структурными схемами является стандартизация формы изображения проектируемых систем, детерминизация процесса получения и преобразованной математической модели сложных систем и сокращение до минимума возможности появления или поиска ошибки в процессе работы.