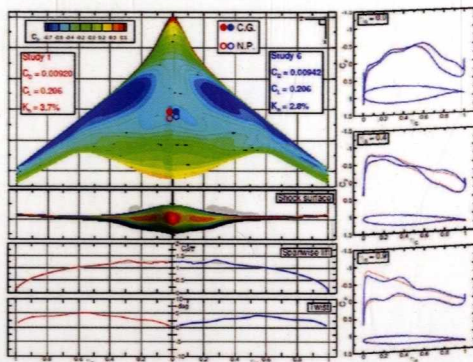
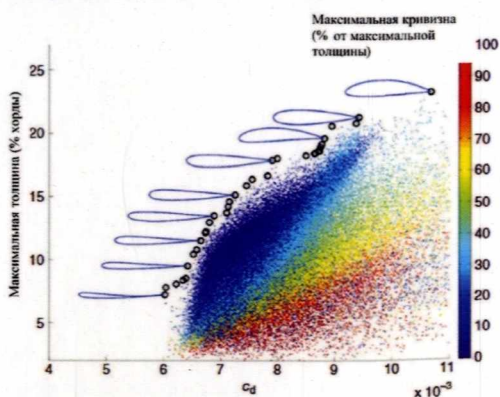
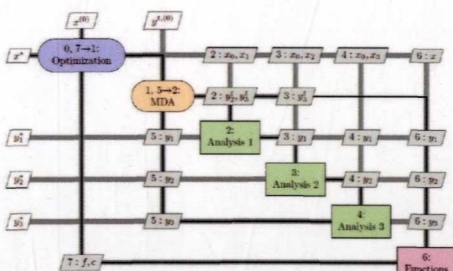
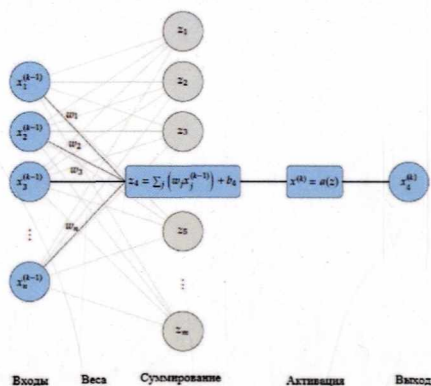


А. Н. Верещага

ББК
22.18
В317

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ



А. Н. Верещага

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Учебник

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 510.644
ББК 22.18
В31

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, декан физико-технического
факультета СарФТИ НИЯУ МИФИ *Чернышев Александр Константинович*;
канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой СарФТИ НИЯУ МИФИ
Батьков Юрий Валентинович

Верещага, А. Н.

В31 Методы инженерной оптимизации : учебник / А. Н. Верещага. –
Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 340 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2139-3

Описаны этапы проектирования и уровни задач оптимизации. Приведена математическая постановка оптимального проектирования: критерии, целевые функции и ограничения. Описаны методы и алгоритмы одномерного, многомерного поиска, многокритериальной оптимизации. Обсуждается оптимизация на основе использования суррогатных моделей, в том числе нейронных сетей. Для технических объектов, параметры которых определяются несколькими физическими процессами, рассмотрены методы междисциплинарной оптимизации. Для разработки сложных технических объектов в условиях неопределенности описано применение метода нечеткой логики: теоретические основы и примеры использования для выбора параметров.

Для студентов инженерных специальностей вузов и технических университетов.



УДК 510.644
ББК 22.18

ISBN 978-5-9729-2139-3

© Верещага А. Н., 2025
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ АВТОРА.....	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	12
1.1. Этапы проектирования.....	13
1.1.1. Требования к техническому изделию	15
1.1.2. Концептуальное проектирование – этап разработки технического предложения.....	29
1.1.3. Предварительное (эскизное) проектирование.....	54
1.2. Уровни задач оптимизации	56
2. ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	58
2.1. Общая постановка задачи проектирования конструкций.....	63
2.2. Целевая функция	66
2.3. Постановка задачи	68
2.4. Классификация задач оптимизации	82
3. МЕТОДЫ ОДНОМЕРНОГО ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ	93
3.1. Экспериментальная параметрическая оптимизация некоторых элементов кузова автомобиля	94
3.2. Основные этапы поиска экстремума.	102
3.3. Методы одномерного поиска.	103
3.4. Этап установления границ интервала.	104
3.5. Этап уменьшения интервала.....	106
3.6. Сравнение методов исключения интервалов.....	116
4. ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ	117
4.1. Критерии оптимальности	117
4.2. Методы прямого поиска (безградиентные методы оптимизации).....	120
4.3. Метод Нелдера-Мида	125
4.4. Обобщенный поиск по образцу (Generalized Pattern Search – GPS).....	133
4.5. Метод генетических алгоритмов.....	141
4.5.1. Генетические алгоритмы с бинарным кодированием	143
4.5.2. Генетические алгоритмы с вещественным кодированием	148
5. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ.....	155
5.1. Множественность целей	155
5.2. Оптимальность по Парето.....	157
5.3. Методы решения	161
5.3.1. Взвешенная сумма	161
5.3.2. Метод эpsilon-ограничения (метод изменения ограничений)	163
5.3.3. Эволюционные алгоритмы	164
5.4. Резюме	175
6. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	177
6.1. Когда используется суррогатная модель?	178

6.2. Образцы (выборка).....	180
6.3. Выборка на основе использования латинского гиперкуба.....	181
6.4. Построение суррогатной модели.....	186
6.5. Линейная регрессия методом наименьших квадратов	188
6.6. Кросс-валидация.....	191
6.7. Используемые базисные функции.....	194
6.8. Искусственные нейронные сети	197
6.9. Практические рекомендации	202
6.10. Оптимизация и заполнение.....	205
6.11. Методические примеры для задачи многокритериальной оптимизации.....	206
6.12. Проектирование параметров процесса аддитивной технологии.....	217
7. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....	221
7.1. Необходимость МДО.	222
7.2. Связанные модели.....	227
7.3. Компоненты.....	229
7.4. Модели и переменные связи.....	230
7.5. Структура связанной системы.....	231
7.6. Единое описание архитектуры МДО.....	233
7.7. Примеры использования методов междисциплинарной оптимизации.....	243
7.7.1. Междисциплинарный анализ на этапе концептуального проектирования.....	243
7.7.2. Аэроструктурная оптимизация крыла самолета.....	243
7.7.3. Оптимизация самолета с плавным переходом крыла к фюзеляжу.	247
8. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ.....	264
8.1. Классификация неопределенности в естественных и инженерных науках	265
8.2. Классификация неопределенности проектирования и разработки сложных систем	269
8.3. Неопределенность условий проектирования сложного технического объекта.	274
8.4. Неопределенность критериев выбора структуры сложного технического объекта.....	276
8.5. Неопределенность критериев выбора окончательного варианта сложного технического объекта.....	277
8.6. Неопределенность как следствие нецелесообразности применения сложных инструментов обоснования и оптимизации параметров сложных технических объектов на начальных этапах разработки	278
8.7. Методы учета неопределенности при проектировании сложных технических объектов.....	279
8.8. Пример: задача выбора формы крыла в плане с точки зрения формирования благоприятного режима сваливания	281

8.8.1. Качественный анализ влияния формы крыла в плане на отрыв потока	283
8.8.2. Переменные факторы, характеризующие задачу.....	287
8.8.3 Результаты моделирования зависимости характеристики сваливания от относительного удлинения, относительного сужения, угла стреловидности и угла атаки.	291
8.9. Пример: оценка относительного собственного веса самолета на основе исторических данных.....	300
8.10. Пример проектирования самолета, компоновка которого определяется системой управления.....	313
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	330
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	332

ОТ АВТОРА

Предлагаемый учебник по основам оптимального проектирования и междисциплинарной оптимизации ставит своей целью показать читателю широкий круг проблем и методов их решения, связанных с оптимизацией параметров сложных технических объектов. Эти проблемы включают этапы проектирования, методы оптимизации, которые могут быть использованы на этих этапах, а также вопросы, которые сравнительно мало обсуждаются в учебниках такого рода – вопросы междисциплинарной оптимизации и проектирование в условиях неопределенности. Детальный перечень вопросов, освещаемых в книге, читатель может видеть в оглавлении.

Особенностью учебника является попытка соблюсти некоторый баланс между описанием процесса проектирования, задачами, решаемыми на каждом из его этапов, и математической стороной методов оптимизации. Удалось ли это автору, решать читателю, но автор убежден в том, что проектировщик не должен замыкаться в области исключительно проектных проблем, как и не должен посвящать себя только проблемам методов оптимизации, их вычислительной реализации, их эффективности и т. д. Особенно это касается первых этапов – разработки требований и этапа концептуального проектирования, сопровождаемых высоким уровнем неопределенности, связанной с временным фактором, с недостатком имеющихся знаний и данных, со сложностью формализации задач выбора структуры сложного технического объекта.

Следствием неопределенности, сопровождающей проектирование сложных технических объектов, является появление в учебнике отдельной главы, посвященной этой проблеме и методам разработки математических моделей в условиях неопределенности. В частности, акцент сделан на применении методов нечеткой логики, позволяющих включить в круг моделируемых факторов качественные переменные, которые могут быть как частью вектора проектных переменных, так и частью вектора выходных переменных, характеризующих технический объект.

В последние годы в автомобильной и аэрокосмической технике все более широкое применение помимо методов классической и многокритериальной оптимизации приобретают методы междисциплинарной оптимизации (МДО), которые позволяют существенно повысить качество решений, принимаемых при выборе параметров объектов проектирования. Возможно, в таком подходе проявляется неосознанное стремление к преодолению описания явлений природы методами различных наук, в то время как она представляет собой единое целое. В связи с проблемами «зеленых» технических объектов с 2024 года наблюдается настоящий бум работ, посвященных применению этих методов для оптимизации, в частности, расхода топлива двигателями самолетов. Вопросу МДО в книге посвящена отдельная глава, в которой выполняется введение в эту обширную тему: описаны особенности МДО, структуры моделей, методы МДО, а также приводятся примеры совместной аэродинамической и прочностной оптимизации при проектировании крыла магистрального пассажирского самолета, а также оптимизации самолета, построенного на базе компоновки с плавным

переходом крыла к фюзеляжу (схемы BWB – blended wing body), широко обсуждаемой в последние годы.

Автор считает необходимым указать еще на одно обстоятельство, не отраженное в книге, поскольку носит существенно более общий характер по сравнению с рассматриваемыми методами. Какие бы передовые методы оптимизации ни были использованы в процессе проектирования сложного технического объекта, окончательный результат разработки будет в значительной степени зависеть от уровня культуры (в широком смысле этого слова) общества, в котором это происходит, поскольку уровень культуры рождает используемые принципы, а те, в свою очередь, оказывают влияние на применяемые методы, инструменты и итоговый результат разработки. Вообще говоря, приведенное утверждение может быть показано на базе применения метода искусственных нейронных сетей, методы которых кратко излагаются в книге, но проблема выходит далеко за ее рамки.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальное проектирование представляет собой одну из инженерных дисциплин, предметом которой является изучение методов поиска наилучшего облика конструкции, выполняющей заданные требования в условиях существования ряда ограничений. Большое значение в оптимальном проектировании отводится подготовке полного перечня требований к разрабатываемому объекту на этапе разработки технического задания, выделению среди них показателей качества и преобразованию наиболее важных из них в критерии оптимизации.

Вопросы обоснования технических требований и формирования критериев оптимальности мы рассмотрим ниже. Сейчас же следует сказать о методическом подходе к изучению курса оптимального проектирования.

Оптимальное проектирование представляет собой свертку двух процессов: проектирования и оптимизации, и, как представляется автору, в интересах проектировщика его не следует сводить ни к одному из них. Наибольшее число учебников в этой области написано с акцентом на методах и алгоритмах оптимизации, например, [1–7]. Являясь, безусловно, полезными, они не показывают другую сторону оптимального проектирования – выбор проектных решений, который во многом представляет собой тот источник проблем, который методы оптимизации отражают математическими средствами. Последнее обстоятельство, по сути, служит причиной подобию проектных методов поиска наилучшего решения и математических методов решения той же задачи. Неформализованными или плохо формализованными все еще остаются ряд проблем, свойственных процессу проектирования сложных технических объектов:

- возможности и качества разработки математической модели критериев оптимальности технического объекта. В том случае, если такая модель не связана с необходимостью описания сложных физических процессов, модель не бывает очень сложной (например, вес технического объекта может быть представлен громоздкой алгебраической моделью, но это не является препятствием к ее формулировке). В иных случаях модель может быть достаточно сложной и быть связана с описанием процессов газодинамики или прочности на основе использования подходов различной степени глубины. В ряде же случаев для создания модели можно воспользоваться историей разработки технических объектов, аналогичных проектируемому, и для построения такой модели может быть использован метод суррогатных моделей¹, например, на основе искусственных нейронных сетей.

В других случаях могут быть не очень ясны критерии, определяющие оптимум разрабатываемого объекта. Примером могут быть столовые приборы или емкости для косметики, например, духов, где крайне важны качественные оценки, для моделирования которых традиционные подходы не применимы;

- с предыдущим связан уровень моделирования при оптимизации технического объекта. По мере усложнения модели, например, от отдельных дета-

¹ Мы будем пользоваться термином «суррогатная модель» за неимением более адекватного термина. Термин «имитационная модель» может считаться наиболее близким к используемому.

лей, через сборочные узлы к техническому объекту в целом (а затем, возможно, к системе взаимодействующих между собой технических объектов), особенно на начальных этапах проектирования, происходит рост неопределенности, связанной с целым рядом обстоятельств: с недостатком информации, с неопределенностью некоторых требований, с неопределенностью технологий, с неполнотой необходимых знаний и т. д. Такого рода неопределенность может преодолеваться различными способами: ранним участием в выставках с демонстрацией достигнутого уровня разработки, применением экспериментальных методов исследования как источника недостающих данных, применением неклассических методов моделирования, позволяющих учесть и сложность, и неопределенность;

– на различных этапах разработки технических объектов существуют различные возможности применения методов оптимизации. Например, на этапе предпроектных исследований или разработки технического предложения не следует использовать сложные математические модели (например, уравнения Навье-Стокса с усреднениями по числу Рейнольдса), которые вследствие трудности реализации вступают в противоречие с изменчивым характером облика конструкции на этом этапе. Важно, чтобы модель критерия оптимальности позволяла описать существенные зависимости от вектора проектных переменных, жертвуя описанием некоторых физических процессов ради того, чтобы можно было предложить один или несколько вариантов облика технического объекта, удовлетворяющие техническим требованиям на разработку, а окончательные его характеристики могут быть обоснованы на следующих этапах его разработки;

– наличием, как правило, не одного, а нескольких критериев, определяющих облик сложного технического объекта. Зачастую эти критерии являются конфликтными, поскольку каждый из них зависит от одного и того же вектора проектных переменных и следует выбрать компромиссную стратегию оптимизации, которая в необходимой степени учитывала бы каждый из них;

– на ряде этапов разработки в качестве окончательного варианта крайне редко выбирается тот, который получается по результатам оптимизационных расчетов, поскольку помимо формальных критериев оптимальности для оценки текущего результата привлекаются и неформальные критерии. Последними могут быть необходимость каких-то финансовых вложений в капитальное строительство, или внешний вид, или даже характер зависимости оптимума от вектора проектных переменных, который редко бывает острым, а зачастую в окрестности оптимума представляет собой достаточно пологую гиперповерхность, что позволяет выбрать окончательный вектор проектных переменных несколько в стороне от формального оптимального значения, но упростив сложности, возможно, связанные с оптимальным решением;

– наконец (возможно, об этом следовало бы сказать раньше) крайне редко, а на практике почти никогда, не используются методы оптимизации структуры сложных технических объектов, выбор которой предшествует последующим этапам разработки и результат которого часто является ключевым для успешности результата проектирования. Проблема выбора структуры (напри-

мер, компоновочной схемы самолета) в терминах оптимального проектирования почти никогда не обсуждается и уход от такого обсуждения оправдывается утверждением, что решение этой задачи представляет собой прерогативу человека.

Перечисленные особенности важно иметь в виду при изучении курса оптимального проектирования и помнить о возможности их учета путем использования подходящих для этого методов. Но из сказанного следует также, что оптимальное проектирование не следует сводить лишь к математическим проблемам, а следует понимать процесс проектирования во всей его сложности, чувствовать его особенности и в зависимости от этого – уместность применения математических методов моделирования критериев оптимальности и применения методов оптимизации.

Не существует алгоритмов оптимизации, являющихся эффективными при решении всех типов задач. В поиске более автоматизированного процесса проектирования мы не должны пренебрегать значением инженерной интуиции, которую часто сложно преобразовать в строгую формулировку задачи и соответствующий алгоритм.

В предлагаемом учебнике автор стремился показать как этапы проектирования, на которых может выполняться поиск наилучшего решения в процессе разработки изделия, так и математические методы его поиска. Уровни решаемых в процессе проектирования задач можно представить себе в форме матрешки. Не с точки зрения их значимости, а с точки зрения последовательности решаемых задач. Если двигаться от внешнего слоя «матрешки» внутрь и при этом сделать акцент на задачах оптимального проектирования, то этот путь можно представить в виде следующей последовательности: общая постановка задачи проектирования технического объекта (ограничимся таким верхним уровнем), постановка задач проектирования элементов сложного технического объекта, постановка задачи оптимального проектирования и анализ результатов оптимизации, разработка методов оптимизационных расчетов и их совершенствование, выполнение оптимизационных расчетов.

В связи с этим учебник состоит из двух частей: в первой части описан процесс проектирования с акцентом на поиск оптимального решения, а во второй части описаны математические методы оптимизации по мере возрастания сложности задач оптимизации – от однокритериальных задач к многокритериальным и затем – к междисциплинарным задачам оптимального проектирования. Отдельное внимание уделяется задачам проектирования в условиях неопределенности, для решения которых рассмотрен лишь один из возможных методов решения подобных задач – метод нечеткой логики.

Чтобы содержание учебника отличалось большей конкретностью, приводится ряд примеров применения методов оптимизации, большинство которых связано с авиастроением, поскольку авиастроение на протяжении длительного времени является лидером по сложности решаемых задач и применения передовых методов проектирования, что как нельзя лучше соответствует предмету учебника – оптимальному проектированию сложных технических объектов. Следует отметить, что многие приводимые примеры представляют собой ре-