

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.А. БУНИНА»

О. Н. Масина, А. А. Петров, О. В. Дружинина

**ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Елец – 2022

УДК 51
ББК 32.97
М 31

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина
от 27.01.2022, протокол № 1

Рецензенты:

Т.Ф. Климова, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Высшая математика и естественные науки»
(Российский университет транспорта);

В.Е. Щербатых, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры математики и методики ее преподавания
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

О.Н. Масина, А.А. Петров, О.В. Дружинина

М 31 Основы методологии научных исследований в области моделирования сложных управляемых систем: учебное пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2022. – 86 с.
ISBN 978-5-00151-294-3

Пособие посвящено вопросам методологии научных исследований, связанных с математическим моделированием сложных управляемых систем. Проанализированы понятия методологии и метода научных исследований. Охарактеризованы общенаучные методы, применяемые на эмпирическом и теоретическом уровнях исследования. Описаны основные виды научных исследований и методы решения научно-технических задач. Рассмотрен алгоритм проведения научного исследования, примеры формулирования темы научного исследования. Описаны особенности постановки научных проблем, формулирования цели и задач научно-исследовательской деятельности. Рассмотрены особенности планирования научно-исследовательской работы. В качестве примера приведены исследовательские задачи поиска оптимальных траекторий сложных технических систем с переключениями и методология их решения. Охарактеризованы программно-аппаратные средства для математического моделирования динамических систем. Рассмотрены вопросы лицензирования программного обеспечения и результатов научной деятельности.

Пособие предназначено для обучающихся в высших учебных заведениях студентов физико-математических и технических направлений подготовки. Пособие может быть использовано аспирантами соответствующих направлений обучения.

УДК 51
ББК 32.97

ISBN 978-5-00151-294-3

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2022

Содержание

Введение	5
§ 1. Понятия методологии и метода научных исследований.....	7
1.1. Сущность методологии и основные группы методов	7
1.2. Методы эмпирического уровня исследования.....	9
1.3. Методы теоретического уровня исследования	13
1.4. Комбинированные общенаучные методы, применяемые на эмпирическом и теоретическом уровнях исследования.....	17
§ 2. Основы научных исследований	23
2.1. Виды научных исследований и методы решения научно-технических задач	23
2.2. Алгоритм проведения научного исследования	28
2.3. Формулирование темы исследования.....	28
2.4. Постановка научной проблемы. Формулировка цели и задач научно-исследовательской работы.....	30
2.5. Признаки актуальности темы и научной новизны исследования	32
2.6. Методы построения и изучения моделей сложных управляемых систем с переключениями	36
2.7. Подготовка и оформление научной статьи.....	41
§ 3. Поиск оптимальных траекторий для технических систем с переключениями	44
3.1. Постановка задачи поиска оптимальных траекторий.....	44
3.2. Примеры задач поиска оптимальных траекторий для моделей технических систем	45
§ 4. Программно-аппаратные средства для математического моделирования динамических систем	52
4.1. Общая характеристика программно-аппаратных средств	52
4.2. Программные компоненты программно-аппаратных средств ...	53
4.3. Сравнение инструментальных средств математических пакетов.	57

4.4. Лицензирование программного обеспечения и результатов научной деятельности.	64
4.5. Аппаратные компоненты программно-аппаратных средств.	68
4.6. Перечень программного обеспечения для математического моделирования.	70
4.7. Разработка проблемно-ориентированного программного комплекса для поиска оптимальных траекторий управляемых систем с переключениями	73
§ 5. Задачи и упражнения	75
Список литературы	79

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие посвящено вопросам методологии научных исследований, связанных с математическим моделированием сложных управляемых систем. Пособие состоит из 5 параграфов.

В §1 проанализированы понятия методологии и метода научных исследований. Охарактеризованы общенаучные методы, применяемые на эмпирическом и теоретическом уровнях исследования.

В §2 описаны основные виды научных исследований и методы решения научно-технических задач. Рассмотрен алгоритм проведения научного исследования, примеры формулирования темы научного исследования. Описаны особенности постановки научных проблем, формулирования цели и задач научно-исследовательской деятельности. Приведены признаки актуальности и новизны научно-исследовательской деятельности. Рассмотрены особенности планирования научно-исследовательской работы.

В §3 на примере актуальных задач поиска оптимальных траекторий сложных технических систем с переключениями рассмотрены постановки задач и основные методы их решения. Даны ссылки на монографии и научные статьи по данному направлению.

В §4 охарактеризованы программно-аппаратные средства для математического моделирования динамических систем. Рассмотрены программные и аппаратные компоненты программно-аппаратных средств. Дан сравнительный анализ инструментальных средств математических пакетов. Рассмотрены вопросы лицензирования программного обеспечения и результатов научной деятельности. Приведен перечень программного обеспечения для решения задач математического моделирования сложных систем.

В §5 содержатся задачи и упражнения, связанные с темами параграфов.

В пособии приведены иллюстрирующие примеры, представлен ряд приложений к задачам поиска оптимальных траекторий.

Рецензируемое пособие предназначено для обучающихся в высших учебных заведениях студентов физико-математических и технических направлений подготовки, а также для самостоятельной работы студентов-заочников различных специальностей. Пособие может быть использовано аспирантами таких направлений обучения, которые связаны с математическим и компьютерным моделированием, численными методами, информатикой и вычислительной техникой, с информационными технологиями.

§ 1. Понятия методологии и метода научных исследований

1.1. Сущность методологии и основные группы методов. Термин «*методология*» дословно означает «учение о методах». В соответствии с этим методология представляет собой область знания, в рамках которой изучаются различные методы познания. Важнейшая задача методологии – это изучение происхождения, сущности, эффективности и других характеристик методов познания. Различным аспектом методологии научных исследований посвящены работы [1, 5, 6, 10, 42, 43, 46, 52, 54].

Термин «*метод*» происходит от греческого слова «методос» - путь к чему-либо. В соответствии с этим, метод – это совокупность приемов и операций практического и теоретического изучения действительности.

Метод содержит в себе систему принципов, требований, правил, руководствуясь которыми исследователь может достигнуть намеченной цели. Отменим, что исторически ученые считали, что правильный метод является ориентиром в движении к истинному знанию. Так, английский философ XVII века Ф. Бэкон сравнивал метод познания с фонарем, освещающим дорогу путнику, идущему в темноте.

Методы научного познания подразделяются по широте применимости в процессе научного исследования.

Первую группу методов познания составляют общепhilosophические методы, имеющие наиболее широкую применимость. В указанной группе их выделяют два: *диалектический* и *метафизический*. Стоит отметить, что с развитием научного познания метафизический метод активно вытесняется из естествознания диалектическим методом.

Под *диалектическим методом* понимается такой метод, при котором объекты и явления рассматриваются системно, с учетом их внутренних противоречий и изменений в развитии, причин и следствий, единства и борьбы противоположностей.

Противоположным к диалектическому методу является *метафизический метод*, при котором объекты рассматриваются обособленно, статично, не учитываются изменения в развитии, не уделяется внимания внутренним противоречиям.

Общенаучные методы познания образуют *вторую группу* методов. Методы этой группы применяются в разных областях науки и междисциплинарных направлениях.

Для общенаучных методов основополагающим понятием является уровень научного познания. Существует два уровня научного познания: эмпирический и теоретический.

К эмпирическому уровню научного познания относят такие методы, как наблюдение, эксперимент и измерение. В свою очередь, к теоретическому уровню познания относятся идеализация и формализация. Кроме того, существуют методы (например, моделирование), которые относятся как к эмпирическому, так и к теоретическому уровню.

На *эмпирическом* уровне происходит процесс интегрирования информации об исследуемых объектах и явлениях путем проведения наблюдений, выполнения измерений, путем планирования и проведения экспериментов. На этом уровне выполняется предварительная систематизация и формализация получаемых данных в виде удобных для той или иной предметной области структур.

Для теоретического уровня научного исследования характерна реализация методов на рациональном (логическом) этапе познания. На указанном уровне выявляются связи и закономерности, свойственные исследуемым объектам, явлениям и процессам. Результатами теоретического познания могут быть гипотезы, теоремы, теории, законы.

Следует отметить, что эмпирический и теоретический уровни познания взаимно дополняют друг друга. Эмпирический уровень служит фундаментом, источником знаний для теоретического. В свою очередь, теоретический уровень определяет методологический базис, необходимый для проведения эмпирических исследований.

Третью группу методов научного познания формируют *частнонаучные методы*, которые применяются лишь в рамках исследований какой-то конкретной науки или какого-то конкретного явления. Для каждой специализированной научной дисциплины (информатика, физика, медицинская наука и т. д.) разработаны и совершенствуются собственные методы исследования.

При этом частнонаучные методы, часто включают в себя различные комбинации общенаучных методов исследования. Например, в этих методах могут фигурировать наблюдения, измерения, формализация, идеализация. Комбинированный характер частнонаучных методов формируется с учетом условий исследования, природы изучаемых объектов, сущности экспериментов. В этом смысле частнонаучные методы согласованы с общенаучными. Следует отметить связь частнонаучных методов познания с диалектическими методами, например, в установленных законах физики и биологии.

1.2. Методы эмпирического уровня исследования.

К методам эмпирического уровня исследования относятся:

- метод научных наблюдений;
- метод экспериментов;
- метод измерений.

Метод научных наблюдений предполагает анализ результатов субъективного восприятия предметов и явлений. Это базовый метод эмпирического познания, направленный на получение предварительной научной информации.

Особенность метода научных наблюдений состоит в наличии:

- целенаправленности;
- планомерности;
- активности.

Целенаправленность состоит в том, что наблюдение должно проводиться для решения задачи исследования, а внимание наблюдателя фиксироваться только на явлениях, связанных с этой задачей. Плановость заключается в том, что наблюдение должно проводиться строго по плану, составленному в соответствии с научной задачей.

Активность подразумевает, что от исследователя требуется инициатива для поиска важных аспектов наблюдаемых явлений с применением знаний, опыта, а также с использованием различных технических средств.

В процессе научного наблюдения, как правило, формируется *описание* объекта изучения, в котором фиксируются существенные для исследования свойства и стороны изучаемого объекта.

По способу проведения выделяют непосредственное и опосредованное наблюдение. При *непосредственном наблюдении* свойства и стороны объекта регистрируются органами чувств человека. При проведении *опосредованного наблюдения* могут быть использованы различные технические средства (в частности, средства фиксации визуальных и звуковых сигналов).

Следует отметить, что на современном уровне развития естествознания характерно увеличение роли *косвенных наблюдений*, при которых регистрируются не непосредственные свойства макрообъектов, а только результаты их воздействия на определенные объекты, которые являются техническими средствами исследования.

Метод научных экспериментов (МНЭ) представляет собой более сложный метод эмпирического познания по сравнению с наблюдением. Как правило, МНЭ основывается на активном, целенаправленном и строго контролируемом воздействии исследователя на изучаемый объект для выявления и изучения различных его сторон, свойств и связей. Изменение или воспроизведение объекта в специально созданных условиях.

Следует отметить, что МНЭ включает в себя другие методы эмпирического исследования, такие как метод научных наблюдение и метод измерений. Кроме того, МНЭ обладает рядом уникальных особенностей.

Первая особенность заключается в том, что эксперимент позволяет изучать объект в «чистом» виде, то есть устранять всякого рода побочные факторы, наслоения, затрудняющие процесс исследования. Например, проведение некоторых экспериментов требует специально оборудованных помещений, защищенных (экранированных) от внешних электромагнитных воздействий на изучаемый объект.

Вторая особенность состоит в том, что в ходе эксперимента объект может быть поставлен в некоторые искусственные, в частности, экстремальные условия, то есть изучаться при сверхнизких температурах, при чрезвычайно высоких давлениях или, наоборот, в вакууме, при огромных напряженностях электромагнитного поля и т.п.

Третья особенность заключается в том, что при изучении какого-либо процесса исследователь, осуществляющий эксперимент, может вмешиваться в него, активно влиять на его протекание.

Четвертой особенностью является высокая степень воспроизводимости эксперимента. Это означает, что условия эксперимента (а соответственно и проводимые при этом наблюдения, измерения) могут быть повторены столько раз, сколько это необходимо для получения достоверных результатов.

Планирование и проведение эксперимента предполагают соблюдение набора условий. В связи с этим научный эксперимент:

- требует ясную формулировку цели исследования;
- основан на исходных теоретических заключениях;
- предполагает такой уровень развития технических средств, который необходим для его реализации;

- предъявляет определенные требования к квалификации исследователя.

Отметим, что исследователем предварительно намечаются способы и план проведения эксперимента. Выполнение всего набора перечисленных условий обеспечивает адекватные результаты экспериментальных исследований.

По характеру решаемых научных проблем выделяют *исследовательские* и *проверочные* эксперименты. Получение новых качественных свойства изучаемого объекта связано с проведением исследовательских экспериментов. В результате интерпретации таких экспериментов могут быть получены выводы, явно не следующие из имевшихся знаний об объекте. Для верификации теоретических конструкций служат проверочные эксперименты.

По характеру получаемых результатов выделяют *качественные* и *количественные* эксперименты. Качественные эксперименты носят поисковый характер и не приводят к количественным соотношениям. Данный вид экспериментов направлен на анализ влияния тех или иных факторов на изучаемый объект или явление. Количественные эксперименты непосредственно связаны с установлением количественных зависимостей в исследуемом явлении.

При решении задач моделирования сложных управляемых систем часто проводятся компьютерные эксперименты по поиску траекторий, по решению задач оптимального управления, по генерации переключений (в переключаемых системах), по машинному обучению и интеллектуальному анализу данных, по решению задач устойчивости и стабилизации [12, 35–37, 40, 57, 58].

Научное измерение представляет собой процесс, который состоит в определении количественных значений различных свойств и сторон изучаемого объекта, явления с использованием специализированных технических инструментов. Как правило, научные эксперименты и

наблюдения включают в себя проведение различных измерений. Результат измерения получается в виде некоторого количественного показателя, выраженного в специальных единицах измерения. Единица измерения представляет собой особый эталон, с которым сравнивается измеряемая сторона объекта или явления (эталону присваивается числовое значение «1»).

В настоящее время общепринятой в естествознании является Международная система единиц (СИ), построенная на базе семи основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль) и двух дополнительных единиц (радиан, стерадиан).

Выделяют несколько видов измерений, среди которых можно отметить статические и динамические. В результате *статических измерений* измеряемая величина остается со временем неизменной (в качестве примера можно привести измерение размеров тел, постоянного давления и т. п.). При *динамическим измерениям* измеряемая величина непрерывно меняется во времени (в качестве примера можно отметить измерение вибрации, пульсирующих давлений и т. п.).

По способу получения результатов выделяют *прямые* и *косвенные* измерения. Для прямых измерений характерно получение искомых значений измеряемой величины при непосредственном сравнении с эталоном или с учетом использования измерительной техники. При косвенном измерении поиск искомой величины выполняется с помощью выбранной зависимости между этой величиной и другими величинами, получаемыми путем прямых измерений.

1.3. Методы теоретического уровня исследования.

- Среди методов теоретического уровня исследования можно выделить
- метод абстрагирования;
 - метод идеализации и мысленного эксперимента;
 - метод формализации.

Под *абстрагированием* в научном познании понимается метод, основанный на мысленном отвлечении от несущественных свойств, сторон и признаков изучаемого объекта с одновременным выделением одной или нескольких существенных сторон, свойств и признаков этого объекта.

При абстрагировании происходит индуктивное восхождение от частных, субъективных свойств конкретных объектов (со всеми их существенными свойствами) к воспроизводимым абстрактным представлениям о них.

Для рассматриваемого метода ключевым понятием является понятие *абстракции*, которая представляет собой результат процесса абстрагирования.

При переходе от субъективного восприятия свойств объекта к абстрактному неизбежно происходит упрощение. Тем не менее, абстракция и теоретизация позволяет глубже понять изучаемый объект, раскрыть его сущность.

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что формирование научных абстракций и общих теоретических положений представляет собой промежуточный этап познания конкретных свойств изучаемых объектов. При этом знание о конкретном будет обладать качественно другими свойствами по сравнению с тем, что было известно до начала абстрагирования.

Вторым важным методом теоретического уровня познания является *идеализация и мысленный эксперимент*. Идеализация представляет собой принятие некоторых допущений о свойствах и сторонах в изучаемого объекта в соответствии с целями исследований. Результатом таких допущений может быть мысленное исключение некоторых свойств и аспектов изучаемого объекта. В частности, распространенная в оптике идеализация – прямолинейное распространение света, не учитывающее дифракции и интерференции. Также для динамики

управляемых объектов можно отметить идеализацию, в рамках которой пренебрегается либо существенно упрощается суть взаимодействия данного объекта с внешней средой (например, пренебрежение сопротивлением воздуха, пренебрежение трением). Следует отметить, что многие идеализации делают невозможным существование эквивалентного объекта в действительности.

Идеализацию изучаемого объекта целесообразна в следующих ситуациях.

1. Если изучаемые объекты или явления достаточно сложны для средств теоретического, в частности математического, анализа; однако при этом по отношению к идеализированному случаю существует возможность построить теорию, пригодную для дальнейшего изучения существенных свойств объекта.

2. Если существует необходимость отбросить некоторые свойства и связи изучаемого объекта, без которых невозможно его существование в действительности, но которые усложняют понимание протекающих в нем процессов. В этой ситуации объекты, исследования которых вызывают существенные затруднения, посредством идеализации представляются в «облегченном» виде, что упрощает их изучение.

3. Если исключаемые из рассмотрения свойства, стороны и связи изучаемого объекта не имеют решающего значения для исследования.

В процессе *мысленного эксперимента* исследователь манипулирует идеализированным объектом. При этом осуществляется «проигрывание» различных возможных положений и ситуаций, которые позволяют выявить новые, ценные свойства исходного объекта. В этом проявляется аналогия между мысленным экспериментом и натурным. Более того, планирование реального эксперимента начинается с проведения мысленного эксперимента с идеализированной версией объекта или явления.

Особая важность мысленного эксперимента заключается в том, что при изучении ряда ситуаций и явлений проведение натурального эксперимента является невозможным. Этот факт делает идеализацию мощным инструментом заполнения пробелов в познании.

Важность идеализации как научного метода состоит в том, что получаемые на ее основе теоретические знания позволяют увеличивать эффективность исследований реальных объектов и явлений.

Получаемые с помощью идеализации упрощения облегчают разработку теории, раскрывающей законы исследуемой области явлений. Если теория в целом правильно описывает реальные явления, то правомерны и положенные в ее основу идеализации.

Еще одним важным методом научного познания является *формализация*, представляющая собой особое направление в научном познании, основанное на использовании специальной символики, позволяющей абстрагироваться от изучения реальных объектов и содержания описывающих их теоретических положений. Формализация дает возможность с помощью знаковой и формульной системы адекватно описывать содержательное знание. Так, например, для построения и изучения моделей сложных управляемых систем часто используется аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений и различные методы их решения [35–37].

Среди условий построения непротиворечивой формальной системы можно выделить:

- задание алфавита в виде упорядоченного набора знаков;
- определение ряда правил, согласно которым формируются из исходных знаков этого алфавита могут быть получены «слова», «формулы»;
- задание правил, по которым от одних слов, формул данной системы можно переходить к другим словам и формулам (так называемые правила вывода).

С соблюдением указанных условий можно создать эффективно используемую формальную знаковую систему в виде определенного *искусственного формализованного языка*.

Важным преимуществом формализованных языков является возможность проведения анализа какого-либо объекта формальным путем (оперирование знаками) без непосредственного обращения к этому объекту и обеспечение краткости и четкости записи научной информации.

Следует отметить, что формализация должна проводиться без отрыва от конкретного эмпирического содержания предметной области и изучаемого объекта или процесса. Так, при описании модели управляемой системы (например, летательного аппарата) с помощью дифференциальных уравнений необходимо учитывать ряд физических эффектов в количественном выражении (например, ускорение).

1.4. Комбинированные общенаучные методы, применяемые на эмпирическом и теоретическом уровнях исследования.

К комбинированным методам научного познания, сочетающим в себе свойства теоретического и эмпирического уровней можно отнести следующие методы:

- анализ;
- синтез;
- индукция;
- дедукция;
- аналогия.

Под *анализом* понимается умозрительная декомпозиция объекта на составные части с целью их отдельного изучения. Такими частями могут выступать какие-либо компоненты объекта или его отдельные свойства, а также признаки и отношения. Анализ относится к начальному этапу познания, а следующий этап познания представлен синтезом.

Синтез заключается в обобщении, интеграции составных частей, элементов, свойств, признаков, связей изучаемого объекта, рассмотренных в процессе анализа. Синтез предполагает изучение объекта с точки зрения единого целого. С учетом того, что синтез – это метод познания, он не эквивалентен простому суммированию всех составных элементов объекта. Он раскрывает место и роль каждого элемента в системе целого, устанавливает их взаимосвязь и взаимообусловленность, т. е. позволяет понять диалектическое единство изучаемого объекта.

Исходя из этого можно сделать вывод, что анализ и синтез – это взаимодополняющие методы научного познания, составляющие комплексный аналитико-синтетический научный метод.

Под *индукцией* понимают метод, заключающийся в выведении умозаключения «от частного к общему». В свою очередь индуктивное рассуждение соответствует движению от частных положений (фактов, данных опыта) к более общим закономерностям

В свою очередь, *дедукция* предполагает выведение умозаключения «от общего к частному». При дедукции осуществляется логический вывод частных положений из более общих. Комбинация дедукции и индукции ведущую роль в логико-математических и естественных науках, например, при доказательстве теорем и лемм.

Аналогия представляет собой метод поиска какого-либо сходства между объектами и построения рассуждения, на основе этого сходства. Иными словами, применение метода аналогии заключается в выявлении подобия, сходства каких-либо свойств, признаков или отношений у различных в целом объектов или явлений.

Основой метода аналогии является сравнение, применяемое для установления сходства или различия между объектами или явлениями.

Умозаключение по аналогии – это логический вывод о наличии какого-либо свойства, признака, отношения у изучаемого объекта на основании установления его сходства с другим объектом. Приведем пример умозаключения по аналогии.

Пусть рассматриваются два объекта: A и B .

Известно, что объект A обладает свойствами: $P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}$.

Исследование объекта B продемонстрировало, что он обладает свойствами: P_1, P_2, \dots, P_n , совпадающими соответственно со свойствами объекта A .

Вывод: на основании сходства ряда свойств (P_1, P_2, \dots, P_n) у объектов A и B , может быть сделано предположение о наличии свойства P_{n+1} у объекта B .

Эффективность метода аналогий можно увеличить, если соблюдать следующие условия:

- рассматривать объекты с большим количеством известных свойств;
- выделять существенные свойства объектов;
- выявлять закономерную взаимосвязь между изучаемыми свойствами.

В общем смысле заключение по аналогии можно определить как перенос информации с одного объекта на другой. При этом первый объект, который исследуется, называют *моделью*. Вторым объектом, на который переносится информация с модели, называют *оригиналом*. В этом смысле модель является аналогией оригинала, с которым модель обладает определенным сходством.

Под *моделированием* понимается метод изучения исходного объекта (оригинала) путем изучения аналогичного (подобного) объекта-заменителя, которым является модель.

Модель можно определить, как мысленно представляемую (записанную в формальном виде) либо материально реализованную систему, которая способна на основе замещения предоставить исследователю новую информацию о поведении или свойствах объекта.

К важным общим особенностям метода моделирования относят:

- существование *объекта-подобия*, замещающего оригинал;

- объект-подобие должен отражать существенные свойства оригинала;
- изучение объекта-подобия должно предоставлять новую полезную информацию об исходном объекте.

Метод моделирования обычно используют в случаях, когда отсутствует возможность непосредственного оперирования оригиналом, либо это оперирование нецелесообразно. Например, перед созданием различных дорогостоящих технических объектов проводят исследования на основе моделирования. Для изучения развития экологических систем (например, водоемов) осуществляют построение моделей динамики с учетом различных параметров и переменных.

Процесс моделирования состоит из трех обобщенных этапов.

Этап 1. Непосредственно *построение модели*, под которым понимается создание определенных условий для равноценного замещения оригинала объектом-подобием, который воспроизводит необходимые параметры оригинала.

Этап 2. *Изучение модели*, которое направлено на получение требуемой информации о модели.

Этап 3. *Экстраполяция*, заключающаяся в переносе полученных и ранее известных знаний на новые условия существования исходного объекта.

Выделяют следующие *элементы* процесса моделирования.

1. *Субъект*, осуществляющий моделирование (исследователь).
2. Изучаемый объект (оригинал).
3. Объект-подобие, т.е. *модель*.
4. *Контекст* моделирования, под которым понимают существующие в момент моделирования условия, присутствующие материально-технические средства.

Модели классифицируются следующим образом.

1. По субстрату выделяют модели:
 - материальные (вещественные);

– идеальные (мысленные).

2. По моделируемым аспектам модели подразделяются на:

- структурные модели;
- функциональные модели;
- модели управления и другие модели.

3. По виду сходства между оригиналом и моделью выделяют модели в форме:

- физического подобия;
- аналоговой модели;
- квазианалоговой модели.

Под *физическим подобием* понимают такую модель, которой свойственно тождество физической природы с оригиналом. *Аналоговая модель* имеет отличную от оригинала физическую природу, однако математически описывается теми же уравнениями. *Квазианалоговая модель* отличается по формальному описанию от оригинала, но позволяет получить эквивалентные оригиналу результаты моделирования.

Можно отметить следующие основные виды моделирования.

Мысленное (идеальное) моделирование, при котором различные умозрительные представления об оригинале обретают форму определенных воображаемых моделей.

В качестве иллюстрирующего примера можно отметить модель атома Резерфорда, которая представляет собой аналогию солнечной системы. Следует отметить, что мысленные (идеальные) модели зачастую могут быть реализованы в форме физических моделей.

В свою очередь, *физическое моделирование* характеризуется ограниченным физическим подобием оригинала и полученной модели с целью воспроизведения изучаемых процессов, свойственных оригиналу.

На основе результатов исследования физических свойств модели делают выводы о явлениях, происходящих (или потенциально происходящих) в «натуральных условиях». В настоящее время областью

применения физического моделирования является, в частности, разработка и экспериментальное изучение различных инженерных сооружений, технических устройств, для лучшего понимания природных сил т. д. Тем не менее, стоит отметить ограниченную применимость физического моделирования по отношению к ряду явлений и процессов.

Символическое (знаковое) моделирование представляет собой условно-знаковое представление определенных свойств или отношений оригинала.

Среди символических моделей можно отметить: разнообразные топологические и графовые представления (в форме графиков, карт, схем и т. п.), а также модели, представленные в виде химической символики и отражающих динамику протекания химических реакций.

Следует отметить, что особо важной разновидностью знакового моделирования является *математическое моделирование*.

С помощью символического языка математики можно выражать существенные свойства, стороны или отношения оригинала через соответствующие уравнения, которые образуют содержательные математические модели исследуемых объектов и явлений.

Важной особенностью рассмотренных методов моделирования является то, что они могут быть использованы совместно. В частности, математическое моделирование может применяться вместе с физическим моделированием, что позволяет исследовать процессы в объекте-оригинале, заменяя их изучением процессов другой природы. Соответственно, механические колебания могут моделироваться электрическими колебаниями при условии достаточного подобия описывающих их дифференциальных уравнений.

Одна из актуальных областей применения математических моделей – это *численное моделирование*, которое основывается на изучении созданной математической модели оригинала с использованием технических средств вычислительных систем. Численное моделирование является незаменимым при обработке больших массивов данных.

Необходимым условием проведения численного моделирования является создание специальной компьютерной программы. В данном случае компьютер вместе с разработанной программой представляет из себя материальную систему, направленную на численное моделирование исследуемого объекта или явления.

Численное моделирование представляет особую важность для изучения таких явлений и процессов, для которых не полностью известна физическая картина изучаемого явления, не очевиден внутренний механизм взаимодействия. Путем проведения различных вычислительных экспериментов ведется накопление новых фактов об оригинале, что в итоге дает возможность получения качественно нового знания.

Примеры построения математических моделей управляемых систем с переключениями приведены в §3 настоящего пособия.

§ 2. Основы научных исследований

2.1. Виды научных исследований и методы решения научно-технических задач. К научно-исследовательской работе относят работу поискового, теоретического и экспериментального характера, которая выполняется с намерением получения новых знаний или применения новых знаний для решения конкретных научных задач. Для словосочетания «научно-исследовательская работа» часто применяют сокращение НИР. В частности, при моделировании сложных систем могут возникать поисковые, теоретические и экспериментальные проблемы.

К опытно-конструкторской работе и технологической работе относится комплекс работ по разработке конструкторской и технологической документации на опытный образец изделия, по изготовлению и испытаниям опытного образца изделия. Для словосочетаний «опытно-конструкторская работа» и «техническая работа» часто применяют сокращения ОКР и ТР соответственно. Для реализации ОКР и ТР разраба-

тываются технические задания, согласно которым проводятся этапы работ. Вопросы, связанные с изложением основ научных исследований, рассмотрены в [11, 14, 33, 34, 56, 59] и в других работах.

На рис. 1, 2 приведена классификация научных исследований по различным критериям.



Рис. 2.1. Классификация научных исследований (I)



Рис. 2.2. Классификация научных исследований (II)

Научные исследования делятся на три основных уровня:

- фундаментальные исследования;
- прикладные исследования;
- производственные исследования.

В процессе *фундаментальных исследований (ФИ)* решаются задачи научного характера и устанавливаются фундаментальные результаты, имеющие важность для науки в целом. Особо важные, прорывные фундаментальные результаты имеют уровень открытий. Для ФИ характерно использование таких творческих методов, которые позволяют моделировать новые ситуации, а также строить новые связи между различными направ-

лениями изучаемой области знания. Изучение таких связей часто приводит к новым качественным эффектам в науке.

В процессе *прикладных исследований (ПИ)* решаются задачи инженерно-прикладного характера и устанавливаются результаты, имеющие важность для какой-либо отрасли науки и техники. Часто завершённые ПИ носят характер изобретений или «ноу-хау». Для ПИ характерно использование таких творческих методов, как методы перебора, методы оценки подобия ситуаций и их модификации.

В процессе *производственных исследований (При)* решаются задачи производственного характера и устанавливаются результаты, имеющие важность для конкретного производства. Завершённые результаты При обычно имеют характер рационализаторского предложения. Для При характерно использование таких методов как механические методы перебора и известные алгоритмы получения результатов.

На современном этапе развития науки для всех трёх типов исследовательской деятельности особенно важное значение приобретает использование программно-аппаратных средств. Для задач математического моделирования сложных управляемых систем характеристика программно-аппаратных средств приведена в §4 настоящего пособия.

Открытие предполагает получение неизвестных раньше, но объективно существующих таких закономерностей, свойств и явлений фундаментальных аспектов бытия, которые вносят наиважнейшие изменения в уровень научного познания.

Для подтверждения открытия требуются непротиворечивые теоретические обоснования и, при возможности, верификация экспериментального характера.

Критериями открытия являются:

- новизна;
- фундаментальность;
- достоверность;

– радикальность характера.

Изобретение представляет собой вновь созданное, ранее не известное оригинальное достижение. Среди объектов изобретения можно отметить законченные устройства, технологии, новые органические или неорганические материалы.

Критериями изобретения являются:

- новизна (предложенное решение ранее неизвестно);
- высокий изобретательский уровень (решение явным образом не следует из существующих решений в данной области);
- применимость на народно-хозяйственном уровне (изобретение может найти применение в той или иной отрасли народного хозяйства).

Рационализаторское предложение (рацпредложение) представляет собой не применявшееся ранее техническое, организационное либо управленческое решение, направленное на оптимизацию производственных процессов на предприятии.

К критериям рацпредложения относятся следующие критерии:

- новизна (данное рацпредложение ранее не применялось на этом предприятии);
- полезность (дает положительный эффект в виде увеличения эффективности производства).

Законченное исследование на соискание ученой степени или присвоение квалификации оформляется в форме *диссертации*. Диссертация (от лат. *dissertatio* – исследование, сочинение, доклад) представляет собой работу (и текст с описанием основных результатов этой работы), успешное выполнение которой является одним из требований для получения ученой степени или квалификации. Содержит обобщение результатов исследований соискателя, проводившихся им за время от нескольких месяцев до нескольких десятилетий. В значительной мере базируется на материале, опубликованном автором в научной печати. Оформляется по определенным правилам в виде переплетенной рукописи или книги объемом

50–500 страниц, в зависимости от отрасли науки и уровня. Подлежит защите на заседании экзаменационной комиссии или диссертационного совета. В современной России защищаются магистерские, кандидатские и докторские диссертации.

2.2. Алгоритм проведения научного исследования. Алгоритм проведения научного исследования состоит из следующих этапов.

1. Выбор темы исследования и обоснование актуальности.
2. Определение объекта и предмета исследования.
3. Постановка научной проблемы. Формулирование цели и задач исследования.
4. Разработка научной гипотезы. Выбор методов проведения исследования.
5. Планирование выполнения научно-исследовательской работы (эксперимента), описание процесса эксперимента.
6. Проведение исследования (эксперимента).
7. Описание результатов процессов исследования. Подготовка проекта отчета.
8. Оформление отчета и его утверждение. Получение заключения, рецензии, отзывов.
9. Внедрение результатов исследования.

2.3. Формулирование темы исследования.

Для того чтобы сформулировать тему исследования, необходимо проработать следующие вопросы. Во-первых, сначала необходимо определить вид исследования и выделить в нем *объект* и *предмет* исследования (ОИ и ПИ соответственно).

Под объектом исследования понимают ту область науки и практики, в которой проводится исследование. Под предметом исследования подра-

зумевают сторону объекта исследования, с которой исследователя интересует этот объект.

Во-вторых, следует обозначить границы исследования (ГИ).

В-третьих, спрогнозировать ожидаемый научный результат (ОНР).

В-четвертых, сформулировать тему исследования (ТИ).

Формулировка темы исследования может осуществляться в нескольких вариантах. Будем использовать такой способ формулирования темы, при котором комбинируются ОИ, ПИ, ГИ и ОНР. Механизм формулирования темы исследования приведен в таблице 1.

Таблица 2.1.

Механизм формулирования темы исследования.

Первый вариант	$ТИ = ПИ + ОНР$
Второй вариант	$ТИ = ПИ + ГИ + ОНР$
Третий вариант	$ТИ = ПИ + ГИ + ОНР + ОИ$

Важно отметить, что формулировка темы исследования должна быть четкой, емкой и демонстрирующей сущность исследования.

Рассмотрим пример формулирования темы исследования в рамках кандидатской диссертации. Пусть рассматриваются следующие объект и предмет исследования.

Объект исследования (ОИ) – управляемые системы.

Предмет исследования (ПИ) – динамика систем с переключениями.

Границы исследования и ожидаемый научный результат выбираются следующим образом:

Границы исследования (ГИ) – трехмерные системы с переключениями.

Ожидаемый научный результат (ОНР) – разработка алгоритмов и программного комплекса для моделирования.

С учетом табл. 2.1 рассмотрим пример формулирования темы исследования.

Первый вариант: $ти=пи+онр$

«Разработка алгоритмов и программного комплекса для моделирования динамики систем с переключениями»

Второй вариант: $ти=пи+ги+онр$

«Разработка алгоритмов и программного комплекса для моделирования динамики трехмерных систем с переключениями».

Третий вариант: $ти= пи+ги+онр+ои$

«Разработка алгоритмов и программного комплекса для моделирования динамики трехмерных управляемых систем с переключениями».

2.4. Постановка научной проблемы. Формулировка цели и задач научно-исследовательской работы. Под *научным направлением* понимают сферу научной деятельности, охватывающую крупные проблемы фундаментального и прикладного характера в определенной области науки.

Научную проблему можно сравнить с барьером, для полного преодоления которого недостаточно имеющегося в настоящее время уровня знаний. Противоречия между состоянием знаний в науке и потребностями практики проявляются с помощью корректных постановок научных проблем, решение которых призвано сузить указанные противоречия.

Цель научно-исследовательской работы должна быть привязана к ответу на вопрос о том, что должно быть получено в результате выполнения этой работы.

Задачи научного исследования должны соответствовать этапам, которые необходимо осуществить для достижения цели исследования.

Далее приведем примеры формулирования этапов исследования:

- аналитический обзор публикаций и результатов по теории управляемых систем;
- эмпирическое установление зависимости;
- синтез математической модели процесса;

- разработка методики обоснования (прогнозирования, расчета);
- проведение серии вычислительных экспериментов по моделированию динамики трехмерных систем с переключениями;
- интерпретация результатов вычислительных экспериментов и выявление качественных эффектов;
- сравнительный анализ и выбор методов (моделей);
- практические рекомендации.

Далее приведем примеры научной проблемы, научных задач и цели исследовательской работы.

Научная проблема. Структурные изменения в процессе функционирования, многорежимность, разнородность описания процессов относятся к особенностям технических систем с переключениями. Систему с переключениями можно представить в виде многорежимной динамической системы с законом переключения режимов, определяющим интервалы активности каждого режима. В связи с этим важным и интенсивно развивающимся научным направлением является математическое моделирование технических систем с переключениями [36, 37].

Научная задача 1: построение и анализ моделей указанных технических систем.

Научная задача 2: сравнительный анализ эффективности алгоритмов переключений.

Научная задача 3: разработка новых алгоритмов переключений с обратной связью.

Цель НИР. Разработка методов и алгоритмов для программного комплекса адаптивного и нейросетевого моделирования технических систем с переключениями.

Возможный план научно-исследовательской работы состоит из следующих пунктов.

1. Разработка плана научной работы.
2. Аналитический обзор литературных и интернет-источников.

3. Выполнение серии экспериментов.
4. Анализ информационных ресурсов.
5. Интерпретация и сравнительный анализ результатов.
6. Написание заключения.
7. Подготовка и оформление отчета или диссертации.
8. Оформление презентации, подготовка доклада и защита.

2.5. Признаки актуальности темы и научной новизны исследования.

Одним из важных требований, предъявляемых к научным работам является *актуальность темы и научная новизна*.

Под актуальностью темы понимается важность научных разработок в данной области с учетом востребованности и перспективности будущих результатов в теоретическом поле и в практической деятельности.

Основными признаками актуальности научного исследования являются следующие признаки:

- выявляемость нерешенных задач или недостаточно изученных вопросов, наличие «белых пятен» в различных областях знания;
- возможность развития и доработки существующих исследований с учетом современного состояния и новых задач;
- возможность разрешения противоречий в спорных вопросах научного знания;
- реализуемость и индуктивность по отношению к имеющемуся научному знанию совместно с возможностями продвижения теории;
- перспективность в плане постановки новых задач, востребованных наукой и техникой.

Обычно во вводной части научного исследования необходимо провести *обоснование актуальности* темы, т.е. пояснить важность изучения выбранной темы с учетом современного состояния данной области науки (техники).

Применительно к диссертационному исследованию, как правило, актуальность обосновывается в разделе «Введение» и затрагивает два аспекта.

1. Актуальность по отношению к социально-экономическому состоянию общества. Здесь подразумеваются особенности современного состояния общества, которые делают тему исследования значимой и существенной для дальнейшего прогресса.

2. Актуальность по отношению потребностям теоретического и прикладного научного знания. Здесь понимается необходимость обоснования того, что данная разработка является своевременной и отвечает как современному состоянию науки, так и потребностям в изучении новых аспектов и в разработке методов и методик данного научного направления.

Особые требования предъявляются к *научной новизне* работы и к вкладу соискателя в соответствующую разработку, которая является оригинальным научным достижением в выбранной области.

Оригинальным (новым) научным результатом является только впервые полученный результат. Следует отметить, что необходимым условием нового научного результата является теоретическая обоснованность, которая также может быть подтверждена эмпирически.

Научная новизна может иметь отношение к следующим категориям:

- известные достижения или хорошо разработанные направления в аспекте их дальнейшего развития, подтверждения и использования в новых областях науки и техники;
- оригинальные идеи, которые впервые выдвигаются диссертантом.

Формальными критериями новизны работы являются следующие критерии.

1. Подробный анализ литературных источников в изучаемой предметной области с учетом изменений за последние годы. Особое внимание должно быть уделено всестороннему охвату известного научного знания с анализом его эволюции. В настоящем пособии на примере области моделирования управляемых сложных систем проанализирован ряд задач и источников литературы по данному направлению (см. §3 и §4).

2. Анализ имеющихся взглядов на изучаемую предметную область. Сравнительный анализ известных достижений, выявление их преимуществ и недостатков.

3. Использование в научном исследовании таких новых фактических материалов и материалов на электронных носителях, которые получены в ходе экспериментов.

4. Уточнение и конкретизация ранее изученных свойств объектов, явлений и процессов.

5. Использование современного программно-аппаратного обеспечения для проведения вычислительных экспериментов и анализа полученных результатов.

В настоящем пособии проведен анализ программного-аппаратного обеспечения применительно к области моделирования сложных управляемых систем (см. § 4).

Компоненты оригинальности научного исследования представлены на рис. 3.

Апробация полученных оригинальных результатов диссертанта осуществляется посредством таких стандартных процедур как:

- участие в научно-исследовательских конференциях и семинарах;
- опубликование статей в рецензируемых научных изданиях;
- регистрация посредством патентов или объектов интеллектуальной собственности.

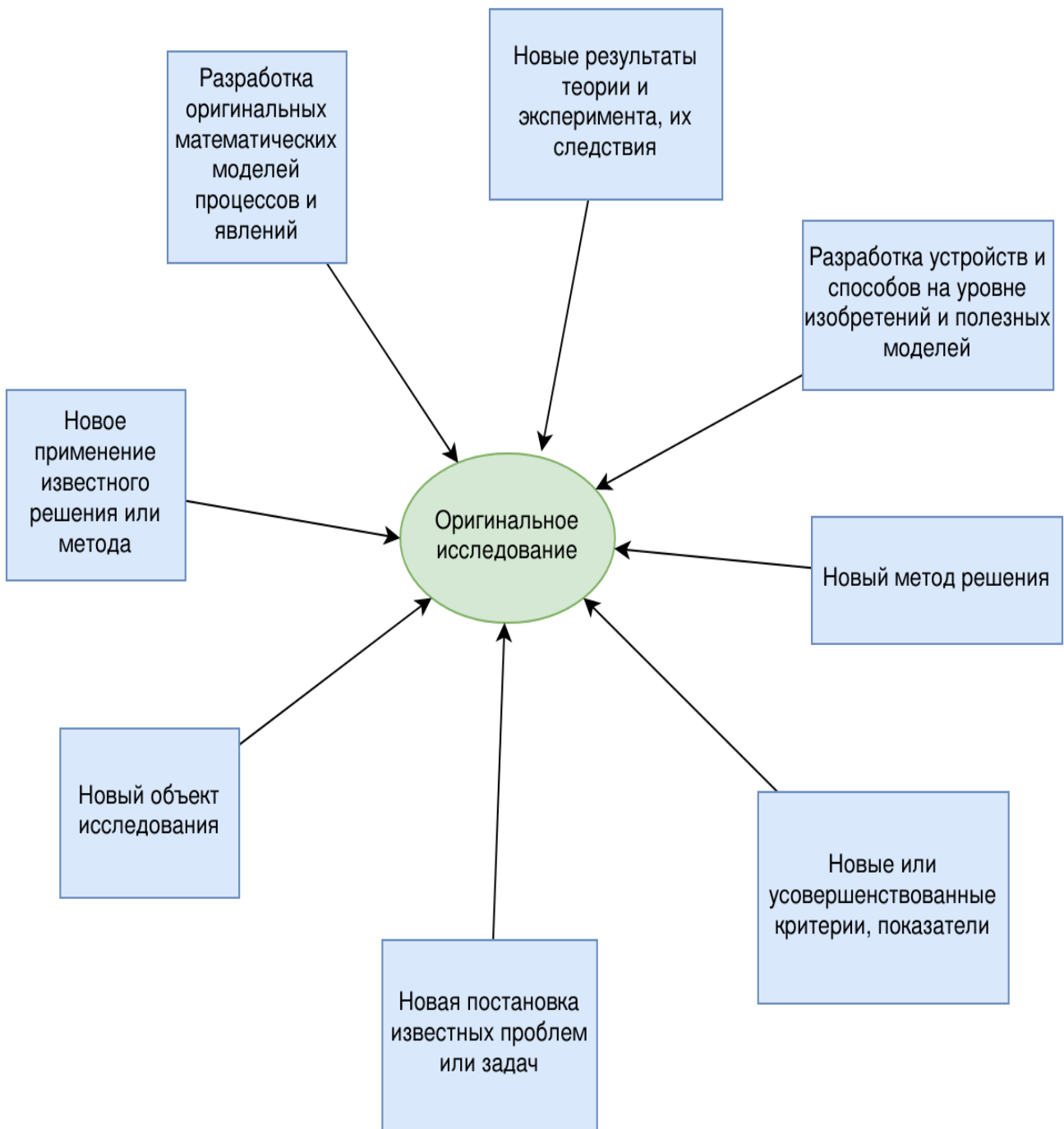


Рис. 2.3. Компоненты оригинальности

Приведем в качестве иллюстративного примера обоснование одного из аспектов актуальности научного исследования по моделированию управляемых систем с переключениями: «актуальность решения задач моделирования управляемых систем с переключениями обусловлена тем, что подобные системы находят многочисленные применения в прикладных проблемах управления механическими системами, технологическими

процессами в переключающихся преобразователях мощности, в управлении движением беспилотных летательных аппаратов, автоматизированных систем транспорта, робототехнических систем и в других областях».

Далее, приведем в качестве иллюстративного примера следующее описание научной новизны полученных в диссертации результатов: « построены обобщенные модели динамики летательных аппаратов при увеличении частоты переключений; разработаны и реализованы новые алгоритмы построения траекторий изучаемых моделей; разработаны и реализованы алгоритмы построения траекторий движения для изучаемых моделей; разработаны и реализованы алгоритмы поиска оптимальных параметров на основе развития методов случайного поиска и роевой оптимизации; проведена верификация результатов модельных экспериментов на основе сравнительного анализа новых и известных алгоритмов и с учетом сравнения свойств траекторий при различных начальных условиях; разработан программный комплекс моделирования технических систем с переключениями».

В заключение отметим особенности планирования научно-исследовательской работы. Любое научное исследование должно быть четко спланировано, т.е. должны быть определены:

- действия (задачи) НИР;
- способу достижения задач;
- материальные и финансовые ресурсы;
- сроки выполнения исследований (теоретических, экспериментальных);
- формы промежуточной и итоговой отчетности;
- ответственные лица.

2.6. Методы построения и изучения моделей сложных управляемых систем с переключениями. Для моделирования технических систем при наличии многорежимности часто используются дифференциальные

уравнения с разрывными правыми частями [26]. Такой математический аппарат позволяет учитывать действие сил, скачкообразно меняющих направление. В частности, к таким силам можно отнести сухое трение, которое оказывает значительное влияние на работу многих устройств, приборов и систем.

В общем виде модель управляемой динамической системы имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, u(t, x), p), \quad (2.1)$$

где $x \in R^n$ – фазовый вектор системы, f – вектор-функция, определяющая структуру модели, t – время, u – вектор-функция управлений, p – вектор проектных параметров [17, 41].

Предполагается, что вектор-функция $f(t, x, u(t, x), p)$ определена для любых $x \in R^n, u \in U^m, p \in P^r, t \in T$, где U^m, P^r – множества управлений и проектных параметров размерности m, r соответственно, T – множество всех возможных значений t . Кроме того, предполагается, что вектор-функция $f(t, x, u(t, x), p)$ непрерывна по совокупности переменных t, x, u, p . Для переключаемых систем достаточно предположить выполнение условий ограниченности и измеримости по x, p . С учетом указанных условий представим далее модель (1) в переключаемой форме

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, u, p), u \in U^m, p \in P^r. \quad (2.2)$$

Актуальные вопросы математической теории систем управления рассмотрены, в частности, в [2, 3, 7, 8, 13, 20, 26, 45, 51].

Поскольку точное интегрирование для ряда моделей может быть выполнено лишь в немногих случаях, при исследовании моделей осуществляется численное интегрирование. Численное интегрирование позволяет получить функции, в той или иной степени близкие к точным решениям исходных динамических уравнений.

Существует достаточно много методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений [9, 39]. Самым простым из них является метод Эйлера, который кратко опишем далее.

Пусть имеется дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), \quad (2.3)$$

где $x \in R^n$, t – время. Исходя из определения производной в окрестности некоторого значения $t = t_i$ будет справедливо равенство

$$\lim_{t_{i+1} \rightarrow t_i} \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} = f(x, t), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Тогда при малом $t_{i+1} - t_i$ значения в узлах $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ можно приближенно найти по формуле

$$x_{i+1} = x_i + (t_{i+1} - t_i) f(t_i, x_i), \quad (2.4)$$

что эквивалентно решению задачи Коши для (3).

Однако следует отметить, что погрешность полученных с помощью (4) значений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ быстро растет вместе с увеличением значения $t_{i+1} - t_i$. Поэтому на практике используются другие, более точные методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений

Важным вспомогательным инструментом изучения моделей переключаемых систем являются методы оптимизации. Процесс оптимизации имеет одну из ключевых позиций в инженерной деятельности, с учетом необходимости, с одной стороны, проектировать новые, более эффективные и менее дорогостоящие технические системы и, с другой стороны, разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем.

Эффективность оптимизационных методов, позволяющих осуществить выбор наилучшего варианта без непосредственной проверки всех возможных вариантов, тесно связана с широким использованием достижений в области математики путем реализации итеративных вычислительных схем, опирающихся на строго обоснованные логические процедуры и алгоритмы, на базе применения вычислительной техники.

Поскольку размерность инженерных задач, как правило, достаточно велика, а расчеты в соответствии с алгоритмами оптимизации требуют

значительных затрат времени, оптимизационные методы ориентированы главным образом на реализацию с помощью ЭВМ.

Алгоритмы оптимизации делятся на следующие два класса.

1. Классические алгоритмы.

2. Популяционные алгоритмы:

– эволюционные алгоритмы (примеры: генетический алгоритм, эволюционные стратегии);

– бионические алгоритмы (примеры: рой частиц, колония муравьев);

– алгоритмы, инспирированные неживой природой (примеры: гравитационный поиск);

– алгоритмы, инспирированные человеческим обществом (примеры: алгоритм эволюции разума);

– другие алгоритмы (примеры: миграционный алгоритм, рассеянный поиск).

Принципы работы указанных алгоритмов приведены в работах [18, 25, 28, 30, 38, 53, 55, 60, 65, 69, 73–76]. Применение оптимизационных методов для решения различных научно-исследовательских задач рассмотрено в [23, 35–37, 47, 61] и в других работах.

Важную роль в проведении вычислительных экспериментов над моделями управляемых систем играют алгоритмы управления. Для сложных систем целесообразно рассматривать алгоритмы интеллектуального управления [15, 22, 44, 77], среди которых можно выделить два основных класса:

– нейросетевые алгоритмы [12, 29];

– алгоритмы на основе нечеткой логики [35–37, 40].

Для *нейросетевых алгоритмов* ключевым понятием является понятие искусственного нейрона. Выходной сигнал нейрона и локальное индуцированное поле нейрона могут быть представлены в виде:

$$y_k = \varphi\left(\sum_{i=1}^m w_{ki}x_i\right), v_k = \sum_{i=1}^m w_{ki}x_i,$$

где w_{ki} – весовые коэффициенты, m – количество входов, x_i – значение i -го входа, φ – функция активации [12, 57]. Искусственные нейроны являются основой для построения искусственной нейронной сети, пример которой представлен на рис. 4.

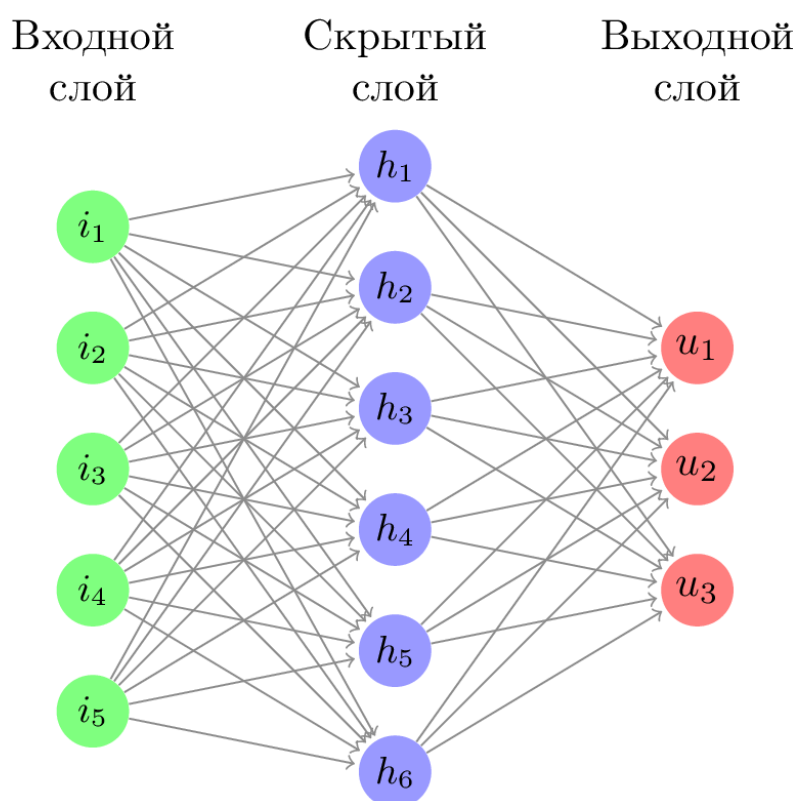


Рис. 2.4. Пример искусственной нейронной сети с топологией 5-6-3.

Указанный пример служит для управления системой с 5 показателями функционирования системы и 3 функциями управления. В скрытом слое содержится 6 нейронов. Подробное описание принципов функционирования и обучения искусственных нейронных сетей приведено в [12, 31, 57, 64].

Одной из наиболее распространенных моделей нечеткого вывода [27] являются модели Такаги-Сугено. Как известно [19, 49], ТС-модель указанного типа описывается правилами типа если...то, которые пред-

ставляют собой локальные линейные отношения вход-выход нелинейной системы. Применяемые правила являются нечеткими только в части «если», а в части «то» содержатся функциональные зависимости. Правила имеют вид:

Правило i : если $x_1(t)$ есть F и ... и $x_n(t)$ есть F , то $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i p(t)$, где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния, $p(t) \in R^m$ – функции входных параметров, $F_{ji}, j=1, 2, \dots, n$ – j -е нечеткое множество i -го правила, A_i и B_i – соответствующие матрицы коэффициентов. Применение моделей нечеткой логики для управления нелинейными динамическими системами рассмотрено в [19, 37].

2.7. Подготовка и оформление научной статьи. В настоящем разделе кратко описаны правила подготовки научной статьи. Как правило, статья включает в себя:

- аннотацию;
- ключевые слова;
- основную часть, включающую в себя введение, разделы и заключение;
- список источников.

Аннотация статьи должна содержать краткое точное изложение содержания статьи. В аннотации обычно приводятся основные фактические сведения и выводы описываемой работы.

Требования к подготовке аннотации состоят в следующем.

Во-первых, аннотация должна быть компактной, но не слишком короткой (в каждом случае объем аннотации диктуется требованиями издательства, часто объем составляет от 100 до 150 слов). В аннотации указывают описательную постановку задачи, цель работы, кратко перечисляют основные результаты и приводят их теоретическую и практическую значимость. Во-вторых, аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов). В-третьих, аннотация должна

быть содержательной (отвечать основному содержанию статьи и результатам исследований). В-четвертых, к аннотации предъявляются требования структурированности (состоящие в следовании логике описания результатов в статье). Отметим, что аннотация, по возможности, не должна содержать формул и специальных символов.

В аннотации указываются новые результаты автора (авторов), выводы, которые опровергают существующие теории, а также приводятся информация о практическом значении результатов.

Ссылки, исторические сведения, если они не составляют основное содержание статьи, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся. В аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, характерные для языка научных и технических документов. Язык и стиль аннотации должны быть ясны широкому кругу специалистов в конкретной области знания.

К ключевым словам относятся слова или фразы, которые наиболее точно характеризуют тему исследования и результаты, содержащиеся в статье. Ключевые слова помогают найти статью при поиске и определить предметную область. Полезной практикой подбора ключевых слов для статьи является возможность представить, по каким поисковым запросам должна быть найдена готовящаяся статья.

Основной текст (содержательную часть) статьи рекомендуется разбивать на разделы (и подразделы, при необходимости), включая вводный раздел (*введение*) и последний раздел (*заключение*).

Введение обычно посвящается обоснованию актуальности исследования, его новизны, степени разработанности темы, а также формулированию цели, задач исследования, описанию прикладной значимости. В этот раздел авторы могут добавлять основные термины, требуемые для описания постановки задачи. В указанном разделе также целесообразно привести аналитический обзор литературы по теме исследования со сравнительным анализом предшествующих результатов.

Последующие разделы статьи включают в себя описание самого исследования, его результатов, приложений, примеров, практических рекомендаций. От самостоятельного исследователя требуются такие умения, как способность выбора задач для исследования, умение использовать имеющиеся и новые средства для проведения исследования; навыки ориентирования в полученных результатах и их корректной интерпретации. Использование собственных, новых средств должно быть обосновано разумной достаточностью и пояснено с помощью указания преимуществ этих новых средств в контексте данного исследования.

В разделе «*заключение*», обычно содержатся выводы и рекомендации, описание практической значимости, а также перечисление перспектив исследования в этой области знаний.

Основными требованиями к содержательной части статьи являются:

- краткость;
- единая система обозначений;
- логичная последовательность изложения;
- точность передачи смысла;
- корректное использование ссылок.

Особое внимание следует уделить корректному использованию ссылок и добросовестному цитированию. При включении в текст цитат, использовании заимствованных из литературных источников фактов, утверждений, экспериментальных данных, изложении точек зрения различных авторов, в статье требуется предоставлять корректные ссылки. Стиль ссылок зависит от требований издательства. Но, как правило, ссылки вставляются в тексте научной работы в виде «[1]». Иногда ссылки добавляются в виде «[1, с. 2]» (первая цифра – порядковый номер, вторая часть указывает на конкретную страницу в книге). Список источников оформляется в конце статьи либо по принципу «первого упоминания в тексте», либо в алфавитном порядке. Стиль оформления библиографических источников определяется требованиями издательства, и авторам следует строго соблюдать этот стиль.

§ 3. Поиск оптимальных траекторий для технических систем с переключениями

3.1. Постановка задачи поиска оптимальных траекторий.

Предположим, что для (2.1) задан начальный момент времени t_0 и множество M_0 допустимых начальных состояний.

Будем считать, что желательно управлять объектом так, чтобы в какой-то конечный момент времени t_1 объект перешел на некоторое множество M_1 допустимых конечных состояний. Будем считать, что допустимое управление $u(t)$ переводит объект из множества начальных состояний M_0 на множество конечных состояний M_1 на отрезке времени $[t_0, t_1]$, если соответствующее этому управлению $u(t)$ фазовое состояние объекта $x(t)$ удовлетворяет условиям

$$x(t_0) \in M_0, \quad x(t_1) \in M_1. \quad (3.1)$$

Заметим, что конечный момент времени t_1 может быть не фиксированным, а определяться из условия попадания вектора $x(t)$ на конечное множество M_1 . Итак, предположим, что допустимые множества M_0 и M_1 заданы. Возможна ситуация, состоящая в том, что управляемый объект можно перевести из множества M_0 на множество M_1 многими способами.

С практической точки зрения желательно среди всех таких переходов выбрать наилучший в каком-либо смысле переход. Обычно предполагается, что каждому допустимому управлению $u(t)$, заданному на отрезке $[t_0, t_1]$, и соответствующей ему траектории объекта $x(t)$ сопоставлено некоторое число J , оценивающее качество пары $u(t), x(t)$, т.е. задан функционал, или критерий, качества $J(u(t), x(t))$. Например, этот функционал может иметь вид

$$J(u(t), x(t)) = \int_{t_0}^{t_1} f^0(p, x(t), u(t)) dt. \quad (3.2)$$

В частности, если рассматривается техническая система, критерий качества управления в форме (2) может определять, сколько энергии тратится на управление, или время, затраченное на перемещение изображающей точки из множества M_0 в M_1 .

Перейдем к формулировке задачи поиска оптимальных траекторий. Эта задача заключается в нахождении такого допустимого управления $u^*(t)$ (при известных проектных параметрах $p^*(t)$, либо их варьировании), а также соответствующей ему траектории объекта $x^*(t)$, переводящей объект из множества начальных состояний M_0 на множество конечных состояний M_1 , что при этом функционал качества $J(u^*(t), x^*(t))$ принимает минимальное значение, т.е.

$$J(u^*(t), x^*(t)) = \min J(u(t), x(t)). \quad (3.3)$$

В (3) минимум рассматривается по всевозможным допустимым управлениям $u(t)$ и соответствующим траекториям $x(t)$, переводящим объект из множества начальных состояний M_0 на множество конечных состояний M_1 .

Можно выделить два основных вида методов поиска траекторий, удовлетворяющих (1) – аналитические методы и методы на основе компьютерного моделирования. К аналитическим методам, в частности, можно отнести формулировку и методы решения задачи поиска оптимальной траектории как вариационной задачи. Однако методы на основе компьютерного моделирования являются более универсальными и охватывают множество отраслей знаний. Рассмотрим вопросы применения методов поиска оптимальных траекторий на основе компьютерного моделирования для модели летательного аппарата.

3.2. Примеры задач поиска оптимальных траекторий для моделей технических систем. Рассмотрим сначала следующий модельный пример. Необходимо синтезировать и найти оптимальные траектории для переключаемой модели летательного аппарата. Вопросам

построения и анализа устойчивости систем с переключениями посвящены работы [16, 67] и в другие работы. Для простоты примем, что движение осуществляется в двух координатах. Начальная точка задает положение летательного аппарата в воздухе и его скорость, конечная точка определяется положением посадки. Примем, что векторная тяга для летательного аппарата задается полиномиальным выражением. Пусть $I(a_1; b_1; a_2; b_2)$ – произвольный вектор начальных условий. Тогда модель с переключениями [24] можно представить в виде

$$m\ddot{x} = PT + mG + D, \quad P \in \Gamma, \quad (3.4)$$

где $P_{m \times n}$ – матрица коэффициентов, $T = (0, t^1, t^2, \dots, t^m)^*$, m – масса, G – вектор потенциального поля (сила тяжести). Здесь Γ – дискретное отображение, ставящее в соответствие определенным моментам времени соответствующую матрицу коэффициентов, D – вектор внешних возмущений, который задается вектор-функцией $D(t, x)$. Для указанной функции справедливо неравенство: $\forall t, x: \|D(t, x)\| < \lambda$, где λ – ограничение на максимальное возмущение.

Нахождение матрицы коэффициентов рассмотрим в двумерном случае. С учетом постановки задачи будем использовать матрицу коэффициентов вида

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим более подробно вектор-функцию $D(t, x)$. Для постановки задачи поиска оптимальных переключений для модели (2) в общем случае не существует гарантированного решения. Абсолютное отклонение от невозмущенной траектории характеризуется выражением

$$\int_0^{t_2} \|D(t, x)\| dt.$$

Поскольку функция D не зависит от элементов матрицы P переключаемых параметров P , минимизация отклонения возможна при

уменьшении пределов интегрирования, т. е. при увеличении количества переключений.

Задача поиска оптимальных траекторий заключается в нахождении такой траектории x^* , что $x(0) = I$, $x(t_2) = B$ с учетом минимального количества переключений и минимизации действующих в системе сил. Таким образом, мы рассматриваем мультикритериальную задачу с ограничениями вида

$$\begin{aligned} |\Gamma(t)| &\rightarrow \min, \\ \int_0^{t_2} \|PT\| dt &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $|\Gamma(t)|$ – мощность множества всех возможных значений Γ , $\|PT\|$ – евклидова норма матрицы (вектор-столбца) PT .

Рассмотрим вопросы построения алгоритма управления с обратной связью при помощи ПИД-регулятора. Схема обобщенного алгоритма переключений при помощи ПИД-регулятора представлена на рис. 1. На этапе активации алгоритма переключений необходимо настроить такой порог срабатываний, на котором происходит дискретизация управления. А именно, вместо непрерывного сигнала мы фиксируем дискретное значение (0 или 1), с помощью которого осуществляется управление переключениями системы.

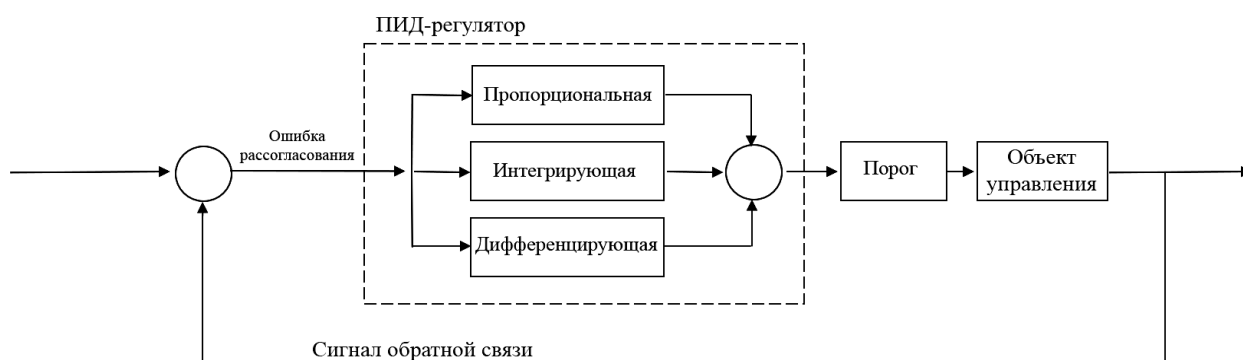


Рис. 3.1. Схема обобщенного алгоритма переключений при помощи ПИД-регулятора

Настройку ПИД-регулятора мы осуществляем с помощью нейросетевого метода оптимизации. В качестве нейронных сетей для настройки ПИД-регулятора наиболее подходят многослойные сети прямого распространения сигнала с одним скрытым слоем и с линейной функцией активации. Отметим, что при настройке коэффициентов ПИД-регулятора имеет место аналогия с подбором весовых коэффициентов нейронной сети. — на основе вычислительного эксперимента и с применением методов локальной или глобальной оптимизации, которые есть в библиотеке SymPy.

Для решения задачи построения алгоритма переключения предложен метод, который основан на переключении матриц управляющих параметров Q с учетом обратной связи. Вопросы построения и анализа алгоритмов рассмотрены, например, в [32].

Далее приведем разработанный для модели (4) алгоритм «Настройка ПИД-регулятора» (Алгоритм 1), который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Инициализировать ПИД-регулятор с произвольными коэффициентами.

Шаг 2. Выполнить алгоритм переключений и получить траекторию.

Шаг 3. Вычислить значение критерия качества.

Шаг 4. Если условие останова выполняется, то работа алгоритма завершена. В противном случае перейти к шагу 5.

Шаг 5. Оптимизировать коэффициенты P , I , D и пороговое значение Ω .

Шаг 6. Перейти к шагу 2.

Настроенный ПИД-регулятор далее используется для поиска оптимальных моментов переключений в управляемой системе (4). В рамках данного алгоритма мы используем методы оптимизации для получения коэффициентов ПИД-регулятора. В данном случае принцип применения методов оптимизации заключается в том, что коэффициенты будут подобраны с учетом минимальности количества переключений.

Блок-схема алгоритма 1 представлена на рисунке 2.

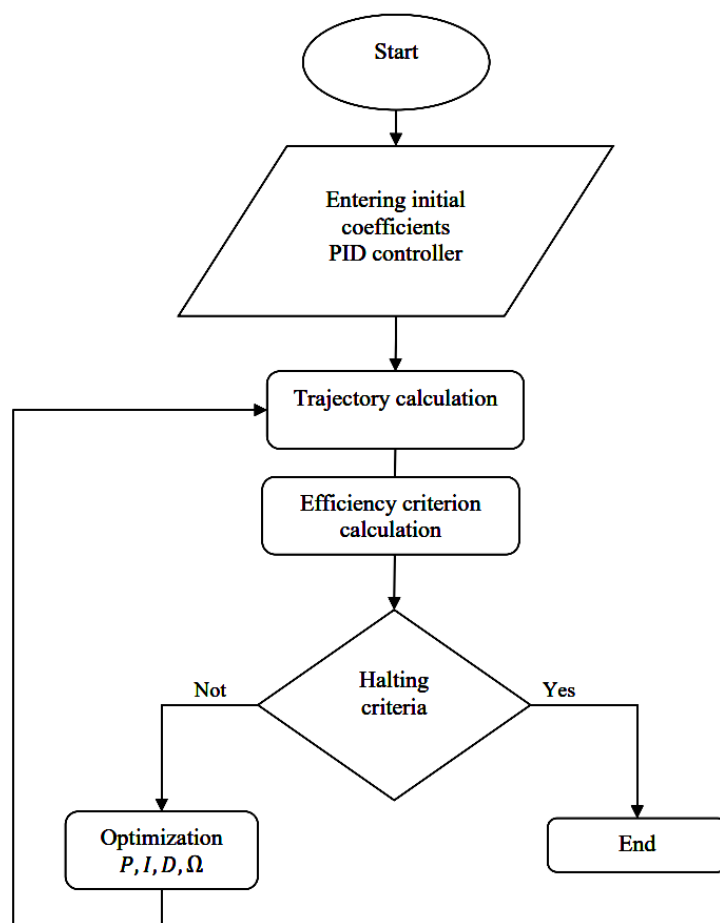


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритма
«Настройка ПИД-регулятора»

Алгоритм 2 включает в себя алгоритм 1. Далее приведем алгоритм 2 «Генерация переключений на основе ПИД-регулятора» для двумерного случая модели (1), который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Настроить ПИД-регулятор (алгоритм 1).

Шаг 2. Выполнить одну итерацию численного алгоритма интегрирования.

Шаг 3. Проверить условие останова. Если условие останова выполняется, алгоритм закончен. В противном случае нужно перейти к следующему шагу.

Шаг 4. Выполнить расчет выводов генератора переключений. Если функция активации на выходе $x > \Omega$, то осуществляется переключение, в ином случае следует перейти к шагу 2.

Шаг 5. Выполнить расчет новых значений матрицы Q .

Шаг 6. Перейти к шагу 2.

Блок схема алгоритма «Генерация переключений на основе ПИД-регулятора» представлена на рисунке 3.

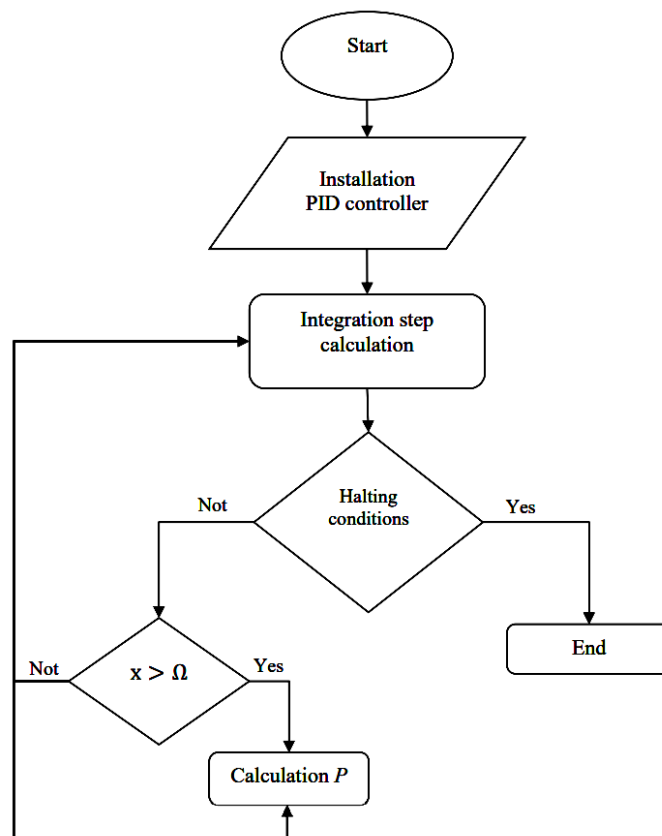


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма «Генерация переключений на основе ПИД-регулятора»

В качестве программного инструмента для создания прототипов программного обеспечения мы используем язык высокого уровня Python 3 с библиотеками NumPy, SciPy, SymPy и Matplotlib для научных вычислений, обработки и визуализации данных.

Разработан прототип программного обеспечения для интерпретации выходного значения ПИД-регулятора. Соответствующий код реализации представлен на рисунке 4.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
mpl.rcParams['font.family'] = 'fantasy'
mpl.rcParams['font.fantasy'] = 'Arial'
from numpy import e, arange
def hp(t, Kp, Ti, Kd, Td):
    z=Kp+Kp*t/Ti+Kp*Kd*e**(-t/Td)
    return z
x=arange(0,10,0.02)
y1=[hp(t,2,2,0,0.5) for t in x]
y2=[hp(t,2,2,4,0.5) for t in x]
plt.plot(x, y2, linewidth=2,)
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Рис. 3.4. Фрагмент программного кода выходного значения ПИД-регулятора

Графическая интерпретация для примера реализации алгоритма 1 приведена на рисунке 5, где $\mu(t)$ – регулирующее воздействие, $\varepsilon(t)$ – сигнал рассогласования, K_p, K_i, K_d – коэффициенты ПИД-регулятора, T_i, T_d – параметры настройки регулятора.

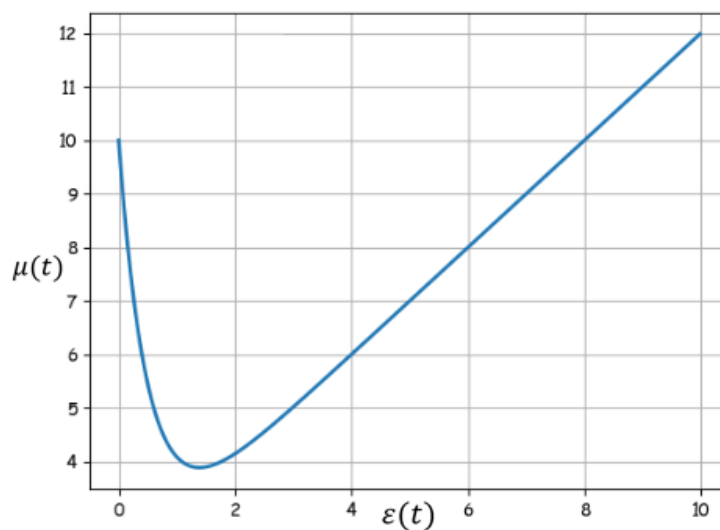


Рис. 3.5. Графическая интерпретация выходного значения ПИД-регулятора

Для моделей (4) возможно построение алгоритмов поиска оптимальных траекторий на основе методов, изложенных в §3, и применения программного обеспечения, рассмотренного в §4. В частности, возможно использование алгоритмов глобальной параметрической оптимизации, алгоритмов нечеткой логики и алгоритмов искусственных нейронных сетей. Формулировка соответствующих задач поиска оптимальных траекторий предоставляется читателю.

§ 4. Программно-аппаратные средства для математического моделирования динамических систем

4.1. Общая характеристика программно-аппаратных средств. В настоящее время важным аспектом методологии научных исследований, связанных с математическим моделированием сложных систем, является умение ориентироваться в современных программно-аппаратных средствах (ПАС), позволяющих проводить вычислительные эксперименты и интерпретировать полученные результаты. Характеристики используемых ПАС имеют непосредственное влияние на результативность проводимых исследований. Следует рассматривать несколько аспектов организации научной работы с применением вычислительных систем. К таким аспектам можно отнести следующие:

- скорость разработки научного ПО;
- масштабируемость размера исследовательского коллектива, эффективность работы в команде, публикационная активность;
- качество и эффективность разработанного ПО;
- переносимость, масштабируемость и прикладная значимость разработанного ПО.

С учетом указанных аспектов целесообразно разделять ПАС на два типа:

- 1) ПАС, направленные на получение научного результата;

2) ПАС, направленные на организацию научной работы (вспомогательные ПАС).

Кроме того, ПАС естественным образом делятся на две ключевые категории:

- 1) программное обеспечение;
- 2) аппаратное обеспечение.

В данном параграфе пособия даются рекомендации по выбору ПАС для тех или иных направлений естественнонаучных исследований, связанных с использованием аппарата математического моделирования.

4.2. Программные компоненты программно-аппаратных средств. Повсеместное распространение высокопроизводительной вычислительной техники выводит на первый план вопрос выбора программных продуктов, которые будут использованы в качестве инструментальных средств проведения научных исследований. При этом необходимо обратить особое внимание на следующие показатели.

- эксплуатационные характеристики и функциональность программного обеспечения ПО;
- сложность освоения ПО и существующий порог вхождения;
- стоимость эксплуатации ПО;
- поддержка ПО разработчиком и сообществом;
- перспективы, направление развития и жизненный цикл программного продукта как единой экосистемы;
- возможности использования программного продукта в профессиональной деятельности;
- возможности коммерциализации производных продуктов и/или полученного результата;
- возможность миграции на аналогичные программные продукты, совместимость с общепринятыми стандартами;
- перечень поддерживаемых аппаратных платформ.

Под *эксплуатационными характеристиками* ПО следует понимать скорость проведения научных исследований (в том числе скорость разработки производного научного ПО), производительность (включая построение масштабных моделей с большим количеством параметров). *Функциональность* ПО заключается в возможности решения ряда вспомогательных задач с применением уже существующего инструментария (например, реализованных в форме модулей алгоритмов оптимизации или алгоритмов решения обыкновенных дифференциальных уравнений).

Сложность освоения ПО и порог вхождения являются индивидуальными параметрами, которые можно определить как временные затраты по освоению ПО на различных профессиональных уровнях. Следует отметить, что данный аспект является особенно важным для групп исследователей.

Под *стоимостью эксплуатации ПО* понимается сумма всех материальных затрат, необходимых на продолжительное использование ПО. Можно выделить прямые затраты (стоимость лицензии и стоимость подписки/сервиса), а также косвенные затраты (стоимость поддержки, стоимость обучения, стоимость амортизации оборудования и т.д.). Следует отметить, что следует уделять особое внимание оценке косвенных затрат на эксплуатацию ПО, в то время как прямые затраты являются очевидными.

Поддержка ПО разработчиком является важным аспектом, определяющим возможность долгосрочного использования комплекса ПАС. К указанной поддержке относятся своевременное исправление ошибок и добавление функциональности, что позволяет формировать новые версии ПО. Кроме того, высокий уровень поддержки предполагает сохранение стабильного уровня функционала ПО на протяжении длительного периода времени, что значительно снижает косвенные затраты на эксплуатацию. *Поддержка ПО сообществом* прежде всего заключается в накоплении опыта использования данного ПО, который может быть полезен при ре-

шении научно-исследовательских задач в различных областях естествознания и техники. Немаловажным фактором в данном случае является численность русскоязычного сообщества пользователей данного ПО.

Оценка перспектив развития и жизненный цикл ПО относится к важным показателям. Жизненный цикл также оказывает большое влияние на долгосрочное использование комплекса ПАС. Любой программный продукт имеет жизненный цикл, который в обобщенном виде представлен на рис. 1.

Следует отметить, что продолжительность данных этапов и возможность перехода от одного этапа к другому в целом зависит от конкретного программного продукта. Использование ПО, находящегося на этапе бета-тестирования, предполагает необходимость повышенного внимания к верификации результатов научного исследования из-за возможных программных сбоев. Кроме того, особое внимание требуется уделить возможности использования ПО, которое относится к категории «legacy».

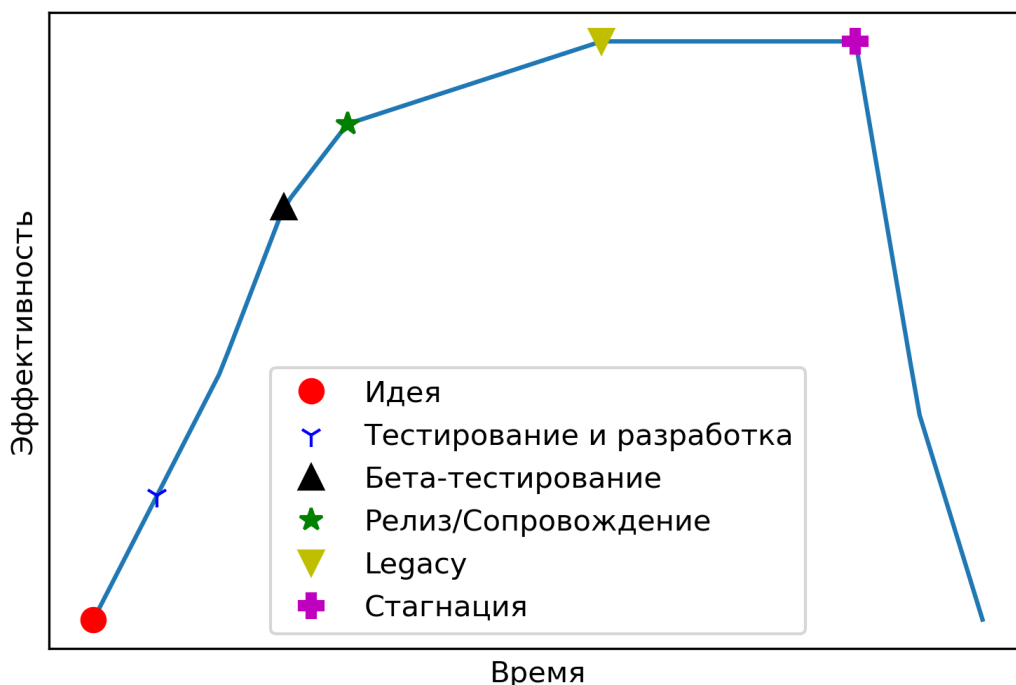


Рис. 4.1. Ключевые этапы жизненного цикла программного продукта

Признаками такого ПО является отсутствие существенных улучшений (выхода существенных обновлений) на протяжении достаточно длительного времени. Как правило, разработчик ограничивается исправлением критических ошибок, либо полностью прекращает разработку, в связи с чем со временем происходит стагнация программного продукта, поскольку он перестает быть безопасным и отвечать требованиям современных комплексов ПАС. Таким образом, можно сделать вывод, что перевод используемого ПО в категорию «legacy» может являться возможной причиной отказа от него.

Возможности использования программного продукта в профессиональной деятельности в основном определяются лицензией на программный продукт. Обычно такие возможности предоставляются владельцем авторских прав без ограничения, однако существует ряд исключений, ограничивающих лицензию личным использованием.

Возможность коммерциализации производного продукта и/или результатов исследования также определяется лицензией на программное обеспечение. Как правило, для коммерческого ПО создание производного продукта требует заключения отдельных договоренностей с владельцем авторских прав.

Возможность миграции на аналогичные программные продукты и совместимость с общепринятыми стандартами прежде всего относятся к вспомогательному ПО, которое имеет достаточно высокий уровень стандартизации. К такому ПО можно отнести офисные пакеты, издательские системы, системы конференц-связи, системы организации совместной работы. Использование указанных типов ПО имеют особенно значение для организации научных конференций и семинаров, на которых излагаются результаты научно-исследовательской работы. Среди программных продуктов, которые можно использовать для решения задач математического моделирования, обычно имеет место эффект ограниченной вза-

имной совместимости. В качестве исключения можно отметить частично совместимые с MATLAB пакеты Octave и Scilab .

Перечень поддерживаемых аппаратных платформ определяет границы применимости результатов к различным отраслям науки и техники. В частности, разработанное с использованием интерпретируемых языков программирования или интегрированных математических пакетов ПО проблематично использовать на встраиваемых аппаратных платформах.

4.3. Сравнение инструментальных средств математических пакетов. Ключевым программным компонентом ПАС является ПО для разработки математических моделей и проведения вычислительных экспериментов. Выбор ПО для разработки математических моделей определяется целью и задачами исследования, а также условиями работы научного коллектива.

В целом, языки и пакеты прикладных программ для математического моделирования можно разделить на две категории:

- языки общего назначения;
- предметно-ориентированные языки и пакеты прикладных программ.

Языки общего назначения – это такой класс языков программирования, возможности которого являются универсальными по отношению к разрабатываемому ПО.

Предметно-ориентированные языки и пакеты прикладных программ направлены на решение комплекса научных и инженерных задач в той или иной области знаний. Следует отметить, что при условии полноты по Тьюрингу [32] строгой границы между языками общего назначения и предметно-ориентированными языками не существует. В таком случае отношение к той или иной категории определяется практикой применения языка. В таблице 1 приводятся некоторые примеры языков согласно приведенной классификации.

Таблица 4.1.

Сравнение языков программирования и пакетов прикладных программ для математического моделирования

Языки общего назначения	Предметно-ориентированные языки и пакеты прикладных программ
<p>Python</p> <p>Является одним из наиболее распространенных языков программирования. Основные преимущества – низкий порог вхождения, высокая скорость разработки, обширное сообщество пользователей. Приобрел большую популярность при решении задач машинного обучения и анализа данных. Стандартная поставка языка не содержит в себе существенных возможностей для научных расчетов, однако для указанного языка развивается ряд широко используемых научных библиотек, среди которых можно отметить <code>scipy</code> (<code>numpy</code> – библиотека тензорных вычислений, <code>sympy</code> – библиотека символьных вычислений), <code>matplotlib</code> [66, 68, 70, 79]. На основе языка развивается ряд интегрированных сред разработки научного ПО, среди которых можно отметить <code>JupyterLab</code> и <code>SageMath</code>. Программы, разработанные на Python, обладают высокой степенью совместимости с различными программно-</p>	<p>MATLAB</p> <p>Представляет собой один из наиболее популярных пакетов прикладных программ и предметно-ориентированных языков программирования [72]. Предоставляет пользователю интегрированную среду разработки, имеет множество инструментов для решения задач, связанных с линейной алгеброй, дифференциальными уравнениями, оптимизацией, параллельным программированием, символьными вычислениями, машинным обучением, статистикой, обработкой сигналов, системами массового обслуживания и др. Предоставляет ряд инструментов, позволяющих строить системы управления промышленного класса. Одной из наиболее полезных возможностей MATLAB является пакет <code>Simulink</code>, позволяющий строить модели системной динамики при помощи блочных диаграмм в интерактивном режиме.</p> <p>Среди преимуществ данного пакета прикладных программ можно</p>

<p>аппаратными платформами [50, 62, 71, 72, 78].</p> <p>Благодаря распространенности, легкости освоения и скорости разработки Python является предпочтительным для начинающих исследователей или неспециалистов в технической области.</p> <p>Среди недостатков языка можно отметить сравнительно низкую производительность в коде, написанном на «чистом» Python (без привлечения дополнительных математических библиотек).</p>	<p>отметить высокую производительность (на уровне компилируемых языков программирования), а также возможность генерации кода для создания как программных, так и аппаратных компонентов ПАС.</p> <p>MATLAB имеет сравнительно низкий порог вхождения, высокую функциональность и ориентирован на исследователей различного уровня.</p> <p>Наиболее существенным недостатком является достаточно высокая стоимость лицензии для академического использования, которая масштабируется с увеличением количества используемых инструментов.</p>
<p>FORTTRAN</p> <p>Является старейшим из языков программирования, используемых на сегодняшний день (первый выпуск относится к 1957 году). Данный язык изначально разрабатывался компанией IBM как язык научных и инженерных расчетов. Фактически FORTRAN является одним из наиболее высокопроизводительных языков для научных расчетов и обладает поддержкой передовых технологий (в частности, OpenACC), что делает его стандартом в системах расчетов промыш-</p>	<p>Scilab</p> <p>Представляет собой один из наиболее популярных открытых аналогов MATLAB.</p> <p>Указанный пакет также имеет ряд инструментов, позволяющих решать задачи, связанные с линейной алгеброй, обыкновенными дифференциальными уравнениями, оптимизацией, символьными вычислениями, статистикой и теорией вероятностей. Имеет возможности по решению задач параллельного программирования, обработке сигналов, а также возможности по работе</p>

<p>ленного класса.</p> <p>FORTRAN является хорошим выбором в качестве инструментального средства разработки, если конечной целью является разработка нового высокопроизводительного ПО для научных расчетов или коммерческого/промышленного решения.</p> <p>Среди недостатков FORTRAN можно отметить высокий порог вхождения и непопулярность языка вне научно-инженерного сообщества.</p>	<p>с 2D и 3D графикой.</p> <p>Аналогом MathWorks Simulink является пакет Scicos, который является гибридом системы моделирования динамических систем и симуляции. В состав пакета входит утилита, позволяющая конвертировать документы Matlab в Scilab. Для численных расчетов используются открытые математические библиотеки.</p> <p>Среди преимуществ Scilab можно отметить относительную простоту освоения, низкий порог вхождения, а также сравнительно высокую производительность.</p> <p>Данный пакет прикладных программ рекомендуется широкому кругу исследователей в качестве бесплатной альтернативы MATLAB.</p>
<p>C / C++</p> <p>Указанные языки являются одними из наиболее распространенных языков высокого уровня для прикладного и системного программирования.</p> <p>Среди преимуществ можно отметить высокую производительность (на уровне FORTRAN), поддержку множества математических библиотек, поддержку стандартов</p>	<p>Mathematica</p> <p>Одна из наиболее известных систем компьютерной алгебры, разработанная Стивеном Вольфрамом в 1988 году.</p> <p>Среди основных аналитических возможностей можно отметить решения систем уравнений различных типов, включая трансцендентные и рекуррентные уравнения, нахождение пределов, решение обыкновенно-</p>

<p>гетерогенного программирования.</p> <p>Использование C / C++ оправдано, если важна производительность и совместимость с большим количеством программно-аппаратных платформ.</p>	<p>венных дифференциальных уравнений, разложение в ряды Тейлора, вейвлет-анализ.</p> <p>Пакет Mathematica распространяется в форме бэкенда, к которому могут подключаться различные пользовательские интерфейсы, включая интегрированные среды разработки, такие как Eclipse или IntelliJ IDEA.</p> <p>Среди преимуществ пакета Mathematica можно отметить низкий порог вхождения, наличие облачных сервисов и интеграцию с фирменной вопросно-ответной системой Wolfram Alpha.</p> <p>Основным недостатком пакета Mathematica можно назвать достаточно высокую стоимость лицензии для образовательных организаций.</p>
<p>Julia</p> <p>Свободный интерпретируемый язык программирования, ориентированный на инженерные и научные вычисления. Первый выпуск состоялся в 2012 году.</p> <p>Целью разработчиков Julia было создание легкого в освоении и высокопроизводительного языка, ориентированного на математические вычисления.</p> <p>Синтаксис языка инспирирован языками C, FORTRAN, Python, Mat-</p>	<p>R</p> <p>Свободный язык программирования для статистической обработки данных, созданный в 1993 году.</p> <p>Интегрированный набор разработки данного языка включает в себя:</p> <ul style="list-style-type: none"> эффективные средства обработки и хранения данных; набор операторов для вычислений на массивах, в частности, на матрицах; большой, согласованный, интегрированный набор промежуточных

<p>lab, R и дает ряд возможностей, облегчающих написание программного кода. В отличие от языков, преимущественно направленных на объектно-ориентированное программирование (например, Python и C++), в Julia используется концепция множественной диспетчеризации, что является удобным для решения ряда научных задач.</p> <p>Среди преимуществ языка можно отметить высокую производительность [80], полную поддержку Unicode, поддержку математических типов данных и математических операций в стандартной поставке. Язык Julia имеет собственный репозиторий пакетов, который дает широкие возможности по использованию готового инструментария для решения ряда научных и прикладных задач.</p> <p>Среди недостатков можно отметить, что ряд инструментов находятся на стадии активной разработки. Кроме того, существуют сложности освоения при миграции с объектно-ориентированных языков.</p>	<p>инструментов для анализа данных; графические средства для анализа и отображения данных на экране или на бумажном носителе;</p> <p>простой и эффективный язык программирования, который включает в себя условные выражения, циклы, определяемые пользователем рекурсивные функции и средства ввода и вывода.</p> <p>Язык R является одним из наиболее популярных открытых языков для обработки статистических данных и может быть полезен в исследованиях, связанных с обработкой больших массивов эмпирических результатов [72].</p>
--	---

Важной характеристикой пакетов прикладных программ является производительность в различных задачах. На рис. 1 представлена сравнительная диаграмма производительности (Julia Micro-Benchmarks) в одинаковых условиях [80] для различных пакетов и языков.

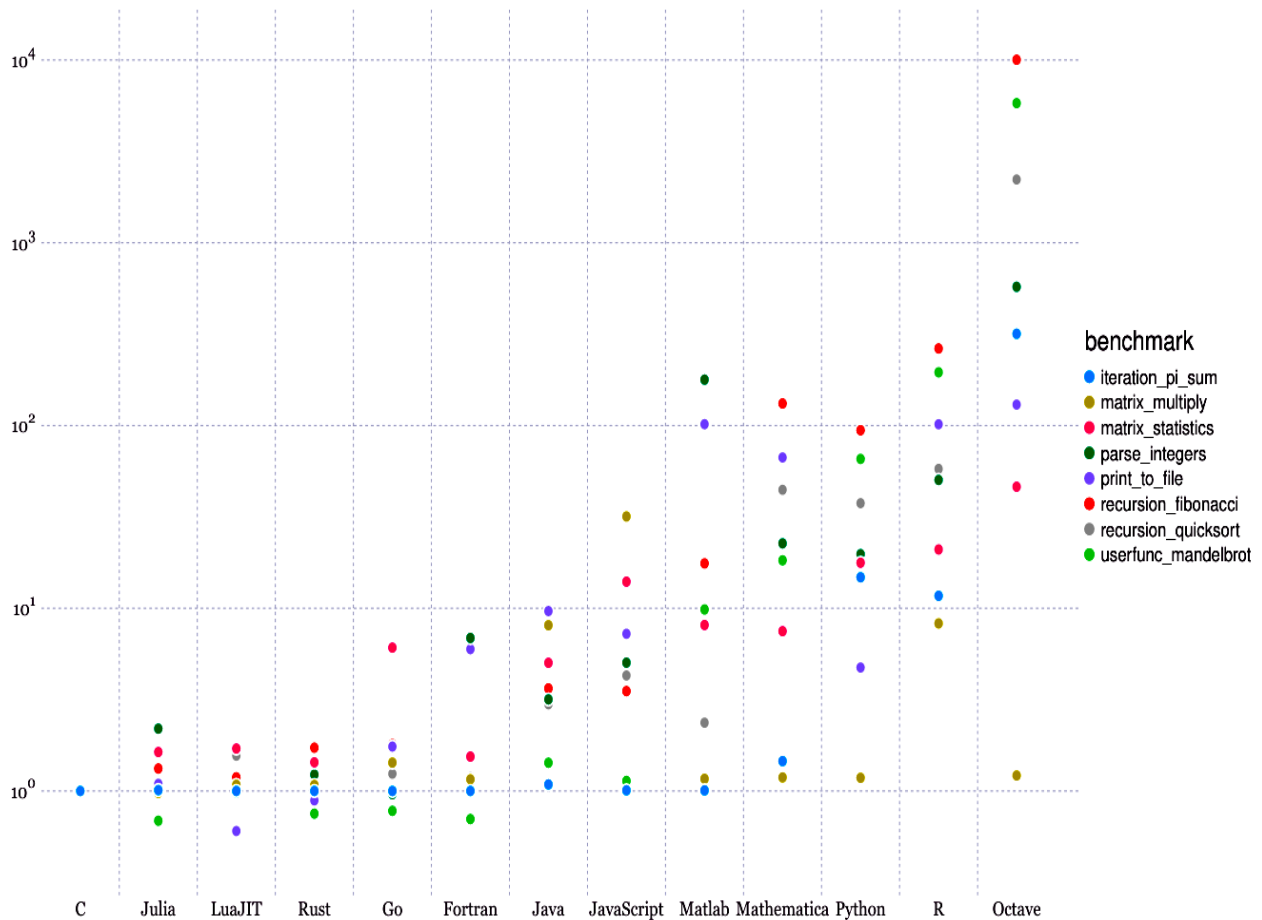


Рис. 4.2. Сравнительная диаграмма производительности для различных языков и математических пакетов

На рис. 1 рассматриваются различные типы синтетических задач: расчет числа π (`iteration_pi_sum`), умножение матриц (`matrix_multiply`), матричная статистика (`matrix_statistics`), парсинг чисел в строке (`parse_integers`), вывод в файл (`print_to_file`), расчет чисел Фибоначчи (`recursion_fibonacci`), быстрая сортировка массива (`recursion_quicksort`), фрактал Мандельброта (`userfunc_mandelbrot`). В качестве единицы отсчета принята скорость прохождения этих тестов для программ на языке C. Следует отметить, что на рис. 1 используется логарифмическая шкала отсчета. Та-

ким образом, разница между самыми быстрыми и самыми медленными бенчмарками составляет порядка $10^3 - 10^4$ раз.

4.4. Лицензирование программного обеспечения и результатов научной деятельности. Важным вопросом выбора компонентов ПАС и проведения научных исследований является корректное лицензирование как используемых инструментальных средств, так и результатов научной деятельности (в т.ч. научных публикаций).

Лицензии на программное обеспечение делятся на две большие категории:

- несвободное программное обеспечение;
- свободное программное обеспечение.

Наиболее распространенной формой несвободного ПО является *проприетарное (закрытое) ПО*. Для указанного типа ПО правоотношения между владельцем исключительных прав и пользователем регулируются пользовательским соглашением (англ. EULA – End User License Agreement), которое регламентирует неисключительные права на пользование данным ПО, а также в ряде случаев ответственность сторон при наступлении непредвиденных обстоятельств. Для проприетарного ПО возможна ситуация, когда лицензия аннулируется в одностороннем порядке из-за нарушения EULA пользователем, либо в случае наступления иных оговоренных обстоятельств. Исходный код проприетарного ПО является собственностью разработчика, пользователь не имеет права получать к нему доступ (изучать, модифицировать, создавать производные продукты, переносить на другие платформы или использовать любым другим способом) без согласия правообладателя. Следует отметить, что важным моментом при использовании проприетарного ПО является вид EULA, под которым оно используется. В качестве примера рассмотрим MATLAB R2022a, для которого доступен ряд лицензий, приведенных в таблице 2 в порядке снижения стоимости.

Таблица 4.2.

Вид лицензии	Описание
Standart	Лицензия для индивидуального исследователя
Education	Лицензия для образовательной/исследовательской организации
Home	Лицензия для персонального (некоммерческого) использования
Student	Лицензия для персонального (некоммерческого) использования студентами и учителями школ

Указанные виды лицензий имеют разную стоимость (может различаться в десятки раз), различные возможности применения, и с момента нарушения EULA лицензия на данный программный продукт становится недействительной.

Преимуществами проприетарного ПО являются высокое качество и эффективность предоставляемого программного продукта, поскольку разработкой и сопровождением занимается коммерческая организация. Недостатками, как правило, являются высокая стоимость и ряд ограничений, накладываемых EULA.

Более комплексным является вопрос применения *свободного программного обеспечения*. Данный тип программного обеспечения связан с распространением исходных кодов ПО при возможности их просмотра, изменения, модификации, изучения, аудита или разработки производных продуктов пользователем. Свободная лицензия в чистом виде не предполагает возмездного использования программного обеспечения. Однако указанное обстоятельство не означает, что разработчик не может брать плату за использование своего программного обеспечения. Согласно ГОСТ Р 54593-2011 программа для ЭВМ с открытым кодом является ПО, распространяемым «на таких условиях простой (неисключительной) ли-

цензии или исключительной лицензии, которые позволяют пользователю доступ к исходным кодам программы» [цитата ГОСТ].

Существует два класса лицензий свободного программного обеспечения:

- «копилефт»–лицензии (протективные);
- пермиссивные лицензии (разрешительные).

Термин «копилефт» (англ. copyleft) означает такой тип лицензии, который имеет следующие свойства:

- позволяет использовать оригинальные (исходные) работы при создании новых (производных) работ без получения разрешения владельца авторского права;
- требует, чтобы два пункта этого списка присутствовали в лицензии производной работы [Fog of the copyleft, 2006].

Таким образом, «копилефт»–лицензии являются противоположными по смыслу «копирайт»–лицензиям (от англ. copyright, авторское право). Можно отметить, что в некоторых публикациях «copyleft»–лицензии называются «вирусными», поскольку обязывают автора производного продукта использовать аналогичные типы лицензий. Существует множество лицензий указанного типа, среди наиболее распространенных из которых можно отметить лицензии семейства GNU General Public License.

Помимо положительных моментов использования инструментального ПО под «копилефт»–лицензией необходимо учитывать, что производные продукты не могут носить характер «ноу-хау» или коммерческой тайны, поскольку сокрытие производного кода прямо противоречит лицензии. На результаты исследовательской деятельности, не связанные с дальнейшим использованием исходного кода, указанное ограничение не распространяется.

Пермиссивные (разрешительные) лицензии на программное обеспечение являются более свободными, чем «копилефт»-лицензии, поскольку они не накладывают ограничений на тип используемой лицензии в производном программном продукте (в том числе допускают проприетаризацию). Пермиссивные лицензии можно считать более предпочтительными в случае, если целью исследования является создание коммерческого продукта. В свою очередь, при публикации результатов исследования под пермиссивными лицензиями нужно учитывать, что они могут быть коммерциализованы третьей стороной. К наиболее распространенным разрешительным лицензиям относятся BSD, MIT, Apache.

Следует отметить, что лицензии на свободное ПО не предполагают отказа от авторских прав. Кроме того, пермиссивные лицензии могут иметь ограничения на использование имени автора оригинального ПО.

Полный отказ от авторских прав на ПО или результат научной деятельности подразумевает перевод в категорию *общественного достояния*.

Отдельным вопросом является выбор лицензии, определяющей вопросы распространения творческого результата научной деятельности (в том числе научных статей). В данном случае общепринятыми являются лицензии семейства Creative Commons, перечень которых представлен в таблице 3.

Таблица 4.3.

Виды лицензий Creative Commons

Лицензия	Описание
<i>Свободные</i>	
CC Attribution (CC BY)	Пермиссивная, требуется указание авторства (последнее справедливо для всех лицензий ниже).
CC Attribution Share-alike (CC BY SA)	«Копилефт»-лицензия, в остальном аналогична CC BY

<i>Несвободные</i>	
CC Attribution – No Derivative Works (CC BY-ND)	Позволяет свободно распространять продукт, без производных работ.
CC Attribution – Noncommercial (CC-BY-NC)	Позволяет свободно распространять и изменять работу на некоммерческой основе. Не требует сохранения лицензии в производных продуктах.
CC Attribution – Noncommercial – Share-alike (CC BY-NC-SA)	Аналогична CC-BY-NC, однако требует сохранения лицензии в производных продуктах.
CC Attribution – Noncommercial – No Derivative Works (CC BY-NC-SA)	Позволяет свободно распространять работу в неизменном виде. Иногда называется «лицензией бесплатной рекламы».

Как правило, выбор какой-либо лицензии Creative Commons является задачей издательств, публикующих результаты в форме интернет-журналов. Однако в случае, если автор публикует научные результаты самостоятельно (в том числе с использованием сети Интернет), использование лицензии позволяет юридически закрепить свои авторские права.

4.5. Аппаратные компоненты программно-аппаратных средств.

Для реализации автоматизированного рабочего места для проведения научных исследований необходимо использование технических средств информатизации и компьютерных сетей.

В зависимости от цели исследования и типа используемых моделей целесообразно рассматривать несколько видов вычислительных систем в порядке убывания производительности:

- суперкомпьютеры;
- вычислительные кластеры;
- высокопроизводительные рабочие станции;

- персональные компьютеры;
- встраиваемые решения.

Суперкомпьютеры относятся к классу наиболее высокопроизводительных вычислительных систем, которые представляют собой большое количество вычислительных машин, объединенных в одну высокопроизводительную сеть. Поскольку суперкомпьютеры в плане производительности масштабируются в ширину, а также имеют ограниченные возможности по скорости взаимодействия внутренних системных компонентов, область их применения заключается в изучении поведения распределенных моделей с большим количеством параметров. В качестве примеров таких моделей можно привести модели масштабных физических процессов, описываемые уравнениями в частных производных (в частности, метеорологические модели), а также модели машинного обучения с большим количеством параметров.

Вычислительный кластер также представляет собой систему, включающую в себя множество компьютеров, объединенных вычислительной сетью, однако масштаб такой системы уступает суперкомпьютеру. По типу решаемых задач вычислительные кластеры аналогичны суперкомпьютерам, однако подразумевают меньшее количество параметров модели. Как правило, применяются в моделировании физических процессов со слабым взаимодействием элементов.

Высокопроизводительные рабочие станции представляют собой высокопроизводительный компьютер, как правило основанный на HEDT-платформе (HEDT – High-End Desktop, высокопроизводительная ЭВМ). Такая рабочая станция может иметь до 64 процессорных ядер в одном корпусе, а также до 256 Гб оперативной памяти. Высокопроизводительная рабочая станция может решать задачи, аналогичные задачам для вычислительного кластера, однако благодаря высокой скорости взаимодействия между вычислительными потоками также возможно изучение сложных сосредоточенных моделей.

Персональные компьютеры (ПК) представляют собой аппаратное обеспечение типового автоматизированного рабочего места. Можно отметить, что существует большой перечень современного аппаратного обеспечения для ПК, многократно различающегося по производительности. Тем не менее, производительности стандартного ПК достаточно для изучения ряда моделей, включая модели в форме обыкновенных дифференциальных уравнений и относительно простые конечно-разностные модели. Кроме того, для ПК широко доступен ряд средств гетерогенного программирования (с применением технологий CUDA, OpenCL, HIP, OpenACC), что многократно увеличивает скорость моделирования (с учетом применения машинного обучения).

Встраиваемые решения представляют собой микрокомпьютеры, которые используются как компоненты других технических систем и устройств. Указанные решения обычно не используются в качестве первичных средств для проведения исследований в области моделирования сложных управляемых систем, однако могут быть использованы для проведения натуральных экспериментов, постройки прототипов технических устройств, а также при разработке коммерческих продуктов. Реализация математических моделей на встраиваемых решениях может быть одной из задач научно-исследовательской работы.

4.6. Перечень программного обеспечения для математического моделирования. В настоящем разделе приведена классификация инструментального программного обеспечения задач поиска оптимальных траекторий в соответствии с различными критериями (таблица 4).

Указанная в таблице 4 классификация расширяет классификацию, приведенную в разделах 4.1 – 4.5, аспектами применимости на различных аппаратных платформах

Таблица 4.4.

Программное обеспечение, ориентированное на решение задач поиска оптимальных траекторий (классификация).

Классификация	Тип	Программное обеспечение
По назначению	Прикладное, предметно-ориентированное	MATLAB (Simulink), Mathematica, Maple, SymPy, SciPy [79], Matplotlib Tensorflow, Keras, PyTorch(Torch), Octave [4, 63], JupyterLab, Maxima
	Вспомогательное	NumPy, ArrayFire, Numba, PyCUDA, EML, cuDNN
	Общего назначения	Python, IPython
По типу лицензии	Открытое/свободное ПО	Python (SymPy, NumPy, SciPy), Octave, JupyterLab, Maxima, Julia, R, Scilab
	Проприетарное/коммерческое ПО	MATLAB (Simulink), Mathematica, Maple, EML
	Смешанное лицензирование, с зависимостью от проприетарных компонентов	PyCUDA, Intel MKL
По типу распространения	Интегрированная среда	MATLAB, Octave, Maple, Mathematica, JupyterLab, SageMath

Классификация	Тип	Программное обеспечение
	Библиотеки/набор библиотек	SymPy, NumPy, SciPy, Arrayfire, Tensorflow, Keras, PyTorch(Torch), FANN2
По целевой аппаратной платформе	Ориентированные на одну платформу	EML(Эльбрус), cuDNN(NVIDIA)
	Многоплатформенные	SymPy, NumPy, SciPy, Arrayfire, Tensorflow, Keras, PyTorch(Torch), Octave, JupyterLab, Maxima, Julia, R
По типу вычислений	Классические (CPU)	SymPy, NumPy, SciPy
	Гетерогенные (CPU+GPU)	Arrayfire, Tensorflow, Keras, PyTorch(Torch), PyCUDA, Numba, cuDNN

Можно отметить необходимость деления ПО по возможной целевой аппаратной платформе, а также деление по типу вычислений (CPU или гетерогенные). Согласованность программного и аппаратного обеспечения ПАС, а также направленность ПАС на эффективное решение научной проблемы является важным научно-методологическим аспектом исследований в области математического моделирования.

4.7. Разработка проблемно-ориентированного программного комплекса для поиска оптимальных траекторий управляемых систем с переключениями. Для изучения моделей переключаемых систем разработан программный комплекс Switched System Modeling Complex (сокращенное название SSMC).

Первая версия программного комплекса SSMC [48] имела ряд недостатков. В частности, можно отметить недостаточную интеграцию модулей и ограниченность возможностей базового графического интерфейса. В связи с этим были разработаны вторая и третья версии программного комплекса.

В результате ряда модификаций программного комплекса SSMC, разработан программный комплекс SSMC (ver. 3), структура которого представлена на рис. 3.

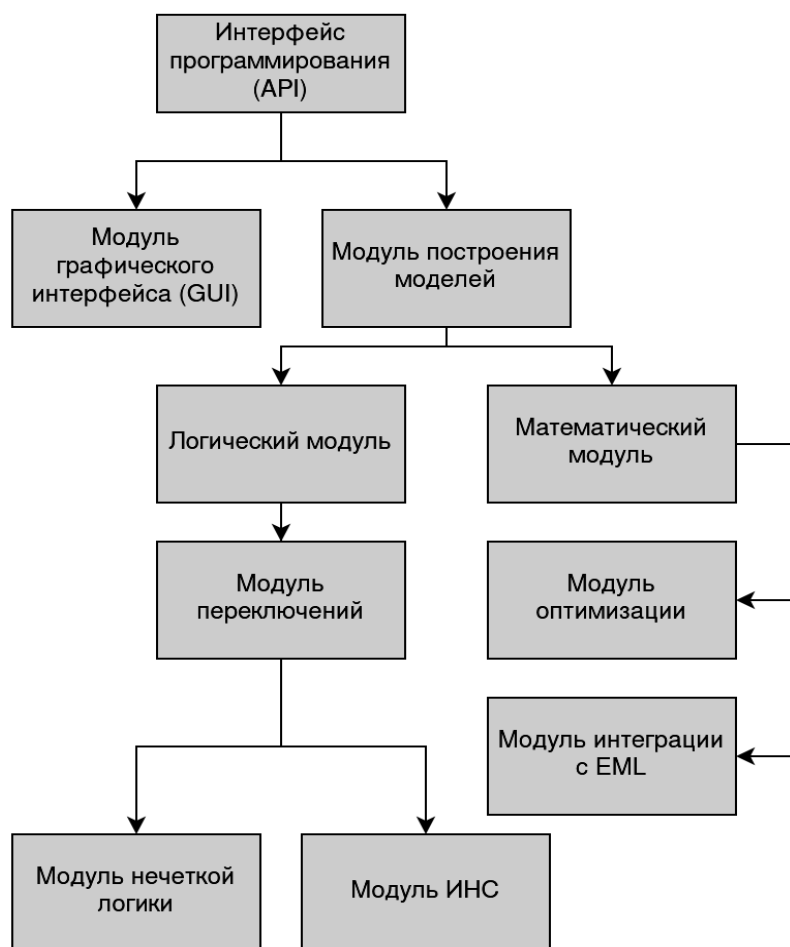


Рис. 4.3. Структура программного комплекса SSMC (ver. 2)

Схема обновленного программного комплекса SSMC имеет иерархическую структуру. На первом уровне находится интерфейс программирования (API), включающий в себя ряд функций для проведения вычислительных экспериментов. На втором уровне располагаются два модуля: вспомогательный модуль графического интерфейса (с использованием `ipywidgets`) и модуль построения моделей.

В свою очередь, модуль построения моделей использует логический модуль и математический модуль. Логический модуль отвечает за внутреннюю организацию построенной модели (переключения, возникновение событий, алгоритмы), математический модуль отвечает за математические операции, алгоритмы оптимизации, а также за интеграцию с различными программно-аппаратными платформами, в частности с библиотекой EML для архитектуры Эльбрус [21].

Для программного комплекса SSMC важнейшим направлением интеграции с программно-аппаратной платформой Эльбрус является использование блока линейной алгебры, который содержит реализацию распространенных библиотек линейной алгебры LAPACK (Linear Algebra PACKage) и BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms). Это позволяет увеличить производительность расчетов для следующих типов операций: расчет ОДУ в виде разностных схем с применением систем линейных алгебраических уравнений; расчет выводов нейросетей и обучение на большом количестве данных. Внедрение модуля интеграции с библиотекой EML направлено на существенное повышение эффективности работы программного комплекса SSMC в рамках вычислительной платформы Эльбрус.

§ 5. Задачи и упражнения

5.1. Методологические основы научного знания

1. Понятие терминов «метод» и «методология».
2. Репродуктивная и продуктивная деятельность человека.
3. Понятие термина «организация».
4. Понятие термина «наука», охарактеризовать признаки науки.
5. Перечислить функции науки.
6. Этапы развития науки.
7. Понятие термина «знание», охарактеризовать виды знаний.
8. Отличие чувственного и рационального познания.
9. Основные структурные элементы познания.
10. Этические основания методологии.

5.2. Выбор направления научного исследования

1. Понятие научно-исследовательской работы.
2. Цель научного исследования.
3. Виды научных исследований.
4. Структурные единицы научного направления.
5. Обоснование актуальности темы научно-исследовательской работы.
6. Понятие рабочей гипотезы.
7. Понятие научной новизны и ее элементов.
8. Этапы научно-исследовательской работы.
9. Варианты получения новых научных результатов.
10. Способы познания истины.

5.3. Поиск, накопление и обработка научной информации

1. Охарактеризуйте понятие «документ».
2. Какие виды документов вам известны?
3. Перечислите методы анализа документов.

4. Сущность метода экспертных оценок.
5. Понятие каталога. Виды каталогов.
6. Принципы ведения рабочих записей.
7. Какие виды рабочих записей существуют?
8. Как составляется уточненный список исходных источников информации?
9. Что такое УДК?
10. Какие существуют принципы отбора и оценки фактического материала?

5.4. Теоретические и экспериментальные исследования

1. Охарактеризуйте теоретические исследования.
2. В чем заключается различие между эмпирическим и теоретическим знанием?
3. Модели теоретического исследования.
4. Какова роль эксперимента в научном исследовании?
5. Какие бывают виды экспериментов?
6. В чем суть вычислительного эксперимента?
7. Что в себя включает план эксперимента?
8. Как планируется эксперимент?
9. Что такое измерение? Его виды.
10. Как организовать рабочее место экспериментатора?

5.5. Обработка результатов экспериментальных исследований

1. Какие бывают виды совокупности измерений?
2. Что такое доверительная вероятность измерения?
3. Как определить минимальное количество измерений?
4. Какие задачи у теории измерений?
5. Сущность метода проверки эксперимента на точность.
6. Метод проверки эксперимента на достоверность.

7. В чем заключается проверка эксперимента на воспроизводимость результатов?
8. Как вычислить критерий Кохрена?
9. Какие методы графической обработки результатов измерений вы знаете?
10. Как оформляются результаты научного исследования?

5.6. Понятие и структура диссертации

1. Что такое диссертация?
2. Как происходит построение гипотезы?
3. Какие требования предъявляются к определению темы?
4. Какова структура диссертации?
5. Что такое объект и предмет научного исследования?
6. Как оценить научную новизну исследования?
7. Что входит в основную часть диссертации?
8. Чем характеризуются научные положения?
9. Какие основные характерные черты аргументации вам известны?
10. Сколько глав включает диссертация? Какова их структура?

5.7. Задания по диссертации

1. Выделить несколько актуальных проблем избранного научного направления по теме диссертации на основе аннотирования статей специальных журналов, периодической печати, книг.

2. Определить актуальность одной из выбранных проблем с обоснованием ее научной и практической значимости.

3. Определить объект и предмет исследования, объективную сферу, на которую направляется внимание исследователя.

4. Сформулировать на основе выбранной темы диссертации для исследования представление об его результате, т.е. цель, затем определение задачи (шаги), которые в совокупности должны дать представление о том, что нужно сделать, чтобы цель была достигнута.

5. Сформулировать научную новизну диссертационного исследования.
6. Представить обоснование (примерное) комплекса методов диссертационного исследования по схеме:
 - теоретические и сравнительные методы;
 - эмпирические методы;
 - методы математической статистики и др.
7. Работа с научной информацией в программе «Антиплагиат».
8. Работа с научной информацией в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверченков В.И., Малахов Ю.А.* Основы научного творчества: учебное пособие для вузов. 3-е изд., стер. М.: Флинта, 2016.
2. *Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М.* Оптимальное управление движением. М.: Физматлит, 2005.
3. *Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В.* Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
4. *Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В.* Введение в Octave для инженеров и математиков. М.: ALT Linux, 2012.
5. *Андреев Г.И., Барвиненко В.В., Верба В.С., Тарасов А.К., Тихомиров В.А.* Основы научной работы и методология диссертационного исследования. М.: Финансы и статистика, 2012.
6. *Афанасьев В.В., Грибкова О.В., Уколова Л.И.* Методология и методы научного исследования: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Издательство Юрайт, 2018.
7. *Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р.* Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 1998.
8. *Афанасьев В.Н., Преснова А.П.* Формирование алгоритмов оптимизации нестационарных систем управления на основе необходимых условий оптимальности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 3. С. 153–159.
9. *Бабенко К.И.* Основы численного анализа. М.: Наука, 1986.
10. *Байбородова Л.В., Чернявская А.П.* Методология и методы научного исследования: учебное пособие. Ярославль: РИО ЯГПУ, 2014.
11. *Бакулев В.А., Бельская Н.П., Берсенева В.С.* Основы научного исследования: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014.
12. *Беркинблит М.Б.* Нейронные сети. М.: МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993.

13. *Благодатских В.И.* Введение в оптимальное управление (линейная теория): учебник. Под ред. *В.А. Садовниченко*. М.: Высшая школа, 2001.
14. *Вайнштейн М.З., Вайнштейн В.М., Кононова О.В.* Основы научных исследований: учебное пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011.
15. *Васильев С.Н.* К интеллектуальному управлению // Нелинейная теория управления и ее приложения. М.: Физматлит, 2000. С. 57–126.
16. *Васильев С.Н., Маликов А.И.* О некоторых результатах по устойчивости переключаемых и гибридных систем // Сборник статей «Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН». Казань: Фолиант, 2011. Т. 1. С. 23–81.
17. *Воронов А.А.* Введение в динамику сложных систем. М.: Наука, 1985.
18. *Газизов Т.Т.* Методы глобальной оптимизации: учебное пособие. Томск: В-Спектр, 2017.
19. *Гостев В.И.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоматор, 2008.
20. *Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М.* Специальные разделы теории управления. Оптимальное управление динамическими системами. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007.
21. *Дружинина О.В., Корепанов Э.Р., Белоусов В.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Развитие инструментального обеспечения отечественной вычислительной платформы «Эльбрус 801-РС» в задачах нейросетевого моделирования нелинейных динамических систем // Нелинейный мир. 2021. Т. 19. № 1. С. 15–28.
22. *Дружинина О.В., Масина О.Н.* Методы анализа устойчивости динамических систем интеллектуального управления. М.: Изд. группа URSS, 2016.
23. *Дружинина О.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Модель управления движением транспортной системы с учетом условий оптимальности, мно-

гозначности и вариативности // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 4. С. 3–9.

24. *Дружинина О.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Разработка алгоритмов поиска параметров моделей управляемых систем с учетом условия минимальности расхода топлива // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 2. Вып. 64. С. 46–54.

25. *Евтушенко Ю.Г., Посыпкин М.А.* Применение метода неравномерных покрытий для глобальной оптимизации частично целочисленных нелинейных задач // ЖВМ и ВМ. 2011. Т.51. № 8. С. 1376–1389.

26. *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Новые типы обратной связи: управление при неопределенности. М.: Физматлит, 1997.

27. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.

28. *Кажаров А.А., Курейчик В.М.* Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач. Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 32–45.

29. *Каллан Р.* Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильямс, 2001.

30. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

31. *Каширина И.А., Демченко М.В.* Исследование и сравнительный анализ методов оптимизации, используемых при обучении нейронных сетей // Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 4. С. 123–132.

32. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ / Под ред. И. В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005.

33. *Кузнецов И.Н.* Основы научных исследований: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. М.: Дашков и К°, 2020.
34. *Лудченко А.* Основы научных исследований. М.: Знания, 2000.
35. *Масина О.Н., Дружинина О.В., Рапопорт Л.Б.* Элементы теории устойчивости математических моделей управляемых систем: учебное пособие. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2019.
36. *Масина О.Н., Петров А.А., Дружинина О.В., Рапопорт Л.Б.* Моделирование и стабилизация нелинейных управляемых систем. Учебное пособие. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020.
37. *Масина О.Н., Петров А.А., Дружинина О.В., Рапопорт Л.Б.* Моделирование управляемых систем с применением методов стабилизации и алгоритмов поиска оптимальных траекторий: учебное пособие. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2021.
38. *Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г.* Методы стохастической оптимизации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.
39. *Махмутов М.М.* Лекции по численным методам. Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2007.
40. *Меренков Ю.Н.* Устойчиво подобные свойства дифференциальных включений, нечетких и стохастических дифференциальных уравнений. М.: Изд-во РУДН, 2000.
41. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
42. *Мокий М.С., Никифоров А.Л.* Методология научных исследований: учебник для магистров ВУЗов. М.: Юрайт, 2014.

43. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология научного исследования. М.: Либроком, 2010.
44. *Осипов Г.С.* Лекции по искусственному интеллекту. М.: Изд. Группа URSS, 2018.
45. *Охорзин В.А., Сафонов К.В.* Теория управления: учебник. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та, 2011.
46. *Папковская П.Я.* Методология научных исследований: курс лекций. Минск: ООО «Информпресс», 2002.
47. *Петров А.А.* Моделирование и построение алгоритма поиска оптимальных параметров управляемых динамических систем, описываемых дифференциальными включениями // *Нелинейный мир*. 2017. Т. 15. № 4. С. 47–52.
48. *Петров А.А.* Структура программного комплекса для моделирования технических систем в условиях переключения режимов работы // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018. Т. 23. № 4. С. 61–64.
49. *Пилиньский М., Рутковская Д., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая Линия–Телеком, 2006.
50. *Плас Дж. В.* Python для сложных задач. Наука о данных и машинное обучение. СПб.: Питер, 2018.
51. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б.* Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. М.: ЛЕНАНД / Изд. группа URSS, 2019.
52. *Пономарев А.Б., Пикулева Э.А.* Методология научных исследований: учеб. пособие. Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014.
53. *Посыпкин М.А.* Параллельный эвристический алгоритм глобальной оптимизации // *Труды ИСА РАН*. 2008. Т. 32. С. 166–179.

54. *Рузавин Г.И.* Методология научного познания: учеб. пособие для вузов. М.: Юнити, 2015.
55. *Сахаров М.К., Карпенко А.П.* Меметические алгоритмы для решения задач глобальной нелинейной оптимизации. Обзор // Наука и Образование. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. Вып. 12. С.119–142.
56. *Умнов В.С., Самойлик Н.А.* Научное исследование: теория и практика: научное исследование: учебник для ВУЗов. Новокузнецк: Кузбасская государственная педагогическая академия, 2015.
57. *Хайкин С.* Нейронные сети. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
58. *Шестаков А.А.* Обобщенный прямой метод Ляпунова для систем с распределенными параметрами. 1-е изд. М.: Наука, 1990. 2-е изд., доп. М.: URSS, 2007.
59. *Щукин С.Г., Кочергин В.И., Головатюк В.А., Вальков В.А.* Основы научных исследований и патентоведение: учебно-методическое пособие. Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2013.
60. *Das A., Kempe D.* Submodular meets spectral: Greedy algorithms for subset selection, sparse approximation and dictionary selection // Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning, Bellevue, WA, USA, 2011.
61. *Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A.* The synthesis of the switching systems optimal parameters search algorithms // Communications in Computer and Information Science (CCIS). Springer, 2019. V. 974. P. 306–320.
62. *Fuhrer C, Solem J.E., Verdier O.* Scientific Computing with Python 3. Packt Publishing, 2016.
63. *Hansen J.S.* GNU Octave. Beginner's Guide. Packt Publishing, 2011.

64. *Johansson E., Dowla F., Goodman D.* Backpropagation learning for multilayer feed-forward neural networks using the conjugate gradient method // International Journal of Neural Systems. 1991. V. 2. № 4. P. 291–301.
65. *Lampinen J.A.* Constraint handling approach for the differential evolution algorithm // Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600). V. 2. IEEE, 2002.
66. *Lamy R.* Instant SymPy Starter. Packt Publishing, 2013.
67. *Liberzon D., Morse A.S.* Basic problems in stability and design of switched systems // IEEE Control systems magazine. 1999. V. 19. № 5. P. 59–70.
68. *Meurer A. et al.* SymPy: symbolic computing in Python // PeerJ Computer Science. 2017. P. 1–27.
69. *Nguyen H., Petrova G.* Greedy strategies for convex optimization // Calcolo. 2017. V. 54. P. 207–224.
70. *Oliphant T.E.* Guide to NumPy. 2nd edition. Create Space Independent Publishing Platform, USA, 2015.
71. *Oliphant T.E.* Python for scientific computing // Computing in Science and Engineering. 2007. V. 9. No. 3. P. 10–20.
72. *Ozgur C., Colliau T., Rogers G.* MatLab vs. Python vs. R // Journal of Data Science. 2017. V. 15. № 3. P. 355–372.
73. *Pinter J.D.* Global optimization: software, test problems, and applications // In: Handbook of Global Optimization. Boston: Kluwer, 2002. P. 515–569.
74. *Plotnikova N.P., Fedosin S.A., Teslya V.V.* Gravitation search training algorithm for asynchronous distributed multilayer perceptron model // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2015. V. 312. P. 417–423.
75. *Sidorov S., Mironov S., Pleshakov M.* Dual greedy algorithm for conic optimization problem // CEUR Workshop Proceedings. 2016. V. 1623. P. 276–283.

76. *Storn R, Price K. Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces // Journal of Global Optimization. 1997. V. 11. P. 341–359.*

77. *Vasilyev S.N., Novikov D.A., Bakhtadze N.N. Intelligent control of industrial processes // Preprints of the 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Saint Petersburg State University and Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, Saint Petersburg, Russia, June 19–21, 2013. P. 49–57.*

78. *Halvorsen H.P. Python for Science and Engineering. 2019.*

79. SciPy 1.6.3 Documentation. Электронный ресурс: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/> (дата обращения: 28.04.2022).

80. Julia Micro-Benchmarks. Электронный ресурс: <https://julialang.org/benchmarks/> (дата обращения: 28.04.2022).

Учебное издание

Масина Ольга Николаевна,
Петров Алексей Алексеевич,
Дружинина Ольга Валентиновна

**ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

*Техническое исполнение – В.М. Гришин
Книга печатается в авторской редакции*

Формат 60 x 84 1/16. Гарнитура Times.

Печать трафаретная.

Печ.л. 5,4. Уч.-изд.л. 5,2.

Тираж 500. Заказ 40

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1