

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.Л. Лазарев

Е.А. Травина

СИНТЕЗ И РАСЧЕТ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
в качестве учебно-методического пособия для реализации образовательных
программ высшего образования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

В.Л. Лазарев, Е.А. Травина. Синтез и расчет систем автоматического управления – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 34с.

Рецензент: Горохов В.Л., докт. техн. наук, проф. ГАСУ, СПб.

Разработано для освоения дисциплин «Обработка информации в системах управления», «Современные методы теории управления в биотехнологической промышленности», «Интеллектуальные системы», а также для выполнения выпускных квалификационных работ (ВКР).

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению магистратуры: 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

©В.Л. Лазарев, Е.А. Травина , 2018

Введение

При написании выпускных квалификационных работ (ВКР) по автоматизации различных технологических процессов и оборудования одним из основных разделов является синтез и расчет систем автоматического управления (САУ).

В зависимости от направленности конкретной работы, при выполнении этого раздела, студентам приходится решать, в основном, какие-либо из следующих задач, актуальных в предстоящей профессиональной деятельности.

1. Синтез системы автоматического регулирования (САР) какого-либо параметра (температуры, давления и др.). Оценка и коррекция динамических свойств систем.
2. Определение параметров оптимального управления в АСУТП (задача оптимизации технологического процесса).
3. Определение параметров режимов автоколебаний в нелинейных системах, обычно в виде амплитуды – A и частоты автоколебаний – ω_a . Необходимость решения такой задачи связана с оценкой частоты срабатывания исполнительного устройства и оценки точности САР.
4. Выбор и реализация подходов и алгоритмов по организации мониторинга и управления различными объектами в условиях неопределенности. Такие задачи лежат в основе создания технологий и методов интеллектуального анализа и управления. Это направление является перспективным и востребованным в современной науке и технике.

Понятно, что представленный перечень задач, актуальных для многих процессов и производств биотехнологической, химической и др. отраслей промышленности не является исчерпывающим. Он может быть пополнен другими задачами, также имеющими отношение к рассматриваемой тематике: организация робастного управления, разработка систем адаптивного управления, анализ и расчет надежности САУ, разработка метрологического обеспечения процессов управления и др.

Ниже даются методические и практические рекомендации по решению основных базовых задач разработки САУ при выполнении ВКР, а также реализации подобных задач в рамках различных дисциплин.

Пособие разработано на основе методических указаний «Расчет систем автоматического управления» для дипломного проектирования для студентов специальности 220300, 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2007, автор Лазарев В.Л., с целью обеспечения преемственности в подходах к решению соответствующих задач и традиций изложения материалов,

практиковавшихся на кафедре АиАПП СПбГУНиПТ, который позже вошел в состав Университета ИТМО.

1. Рекомендации по синтезу САР

Задача синтеза САР, в общем виде, сводится к созданию системы, на основе некоторых исходных компонент, обладающей заданными свойствами. Частным вариантом такой задачи, например, является задача по определению настроечных параметров управляющего устройства (регулятора) для заданного объекта управления, при заданных требованиях к качеству процесса управления (например, в виде предельных значений величин ошибок, параметров переходного процесса, а также требований к запасу устойчивости, надежности, потребляемой мощности системы управления и т.п.). Другим вариантом задачи синтеза САР является определение и расчет корректирующих звеньев (цепей коррекции), для включения в контур системы с целью придания ей требуемых свойств и качеств. Существуют иные варианты постановки подобных задач [1-4].

Сложность и противоречивость требований, которые могут предъявляться к САР, не позволяет зачастую осуществить строгую математическую формулировку критерия оптимизации для синтеза системы. В этом случае возможно, путем упрощения требований для различных ситуаций, произвести синтез нескольких вариантов САР, из которых путем дальнейшего сравнения выбрать наилучший.

Приступая к синтезу САР, необходимо четко сформулировать исходные данные и требования к системе. Таковыми обычно являются следующие блоки данных.

1. Состав и параметры не «варьируемой» части системы.

Некоторые звенья системы могут быть априори определены непосредственно из задания на проектирование. Сюда, как правило, относятся объект управления и, возможно, входящие в его комплектацию первичные преобразователи и исполнительные устройства. Математическое описание таких звеньев, например, в виде передаточных функций, может быть взято из соответствующей документации (паспортов, технического описания, инструкций по эксплуатации и др.).

При отсутствии такой документации необходимые передаточные функции могут быть получены экспериментальным путем по переходным или частотным характеристикам этих звеньев с помощью известных методик [1-4]. В отдельных случаях, для достаточно простых объектов, передаточная функция может быть выведена аналитическим путем.

2. Требования к свойствам САР.

В инженерной практике при синтезе САР в биотехнологической промышленности наиболее часто используются следующие требования [4].

а) Требования к устойчивости САР.

САР должна быть не только устойчивой, но также обладать необходимым запасом устойчивости по фазе ($\Delta\varphi$) и по амплитуде (ΔL). Если в задании на проектирование эти условия специально не оговариваются, то в общепринятой инженерной практике применяются требования

$$\begin{cases} \Delta L > 9 \text{ дБ}; \\ \Delta\varphi \geq 30^\circ. \end{cases} \quad (1)$$

б) Требования к параметрам переходного процесса.

Эти требования, в основном, формулируются в виде ограничений, налагаемых на время переходного процесса – $t_{\text{п}}$ и величину перерегулирования или динамический заброс – σ , в следующем виде

$$\begin{cases} t_{\text{п}} \leq t_{\text{доп}}; \\ \sigma \leq \sigma_{\text{доп}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $t_{\text{доп}}$, $\sigma_{\text{доп}}$ – предельно допустимые значения параметров, которые задаются в каждом конкретном случае исходя из специфики работы системы.

в) Требования к ошибкам ε в установившемся режиме в виде

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Помимо вышеуказанных требований, при синтезе САР, также могут вводиться дополнительные ограничения на потребляемую мощность, габариты и вес системы, а также требования оптимизации (обычно в смысле минимизации или максимизации) какого-либо наперед заданного критерия оптимизации или т.н. целевой функции. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [4].

Методы решения такого рода задач с различными вариациями достаточно подробно изложены в литературе [1-5]. Кроме того, подобные задачи студенты уже решали в курсовом проектировании на предыдущих этапах обучения по этой же специальности бакалавриата (например, при изучении дисциплин «Теория автоматического управления» и «Автоматизация технологических процессов отрасли»). Для выполнения необходимых расчетов и построения различных графических зависимостей удобно использовать пакеты прикладного программного обеспечения (ПО):

MATLAB, Simulink и др. [6, 7]. Отдельные блоки этого ПО удобно использовать для реализации различных этапов решения такого рода задач: вычисления корней характеристического уравнения, построения ЛАХ, ФЧХ, кривых годографа АФЧХ и др.

В частном случае, когда задача синтеза системы сводится только к выбору закона регулирования и определения его параметров при заданных элементах системы (объект, первичный преобразователь, исполнительное устройство и др.) и параметрах переходного процесса, целесообразно воспользоваться типовыми методиками с использованием соответствующих графиков и диаграмм [1, 3, 8].

2. Оптимизация управления в АСУТП

Под оптимальным понимается такое управление, при котором обеспечивается экспериментальное (обычно в смысле *min* или *max*) значение показателя работы системы, называемого целевой функцией или критерием оптимальности.

При выполнении этого раздела студентам, чаще всего, требуется определить оптимальное сочетание управляющих воздействий (режимных параметров объекта или технологического процесса) либо создать методику, алгоритмическое или программное обеспечение решения такой задачи для условий конкретного производства.

Формулировка задачи оптимального управления предусматривает определение следующих основных блоков:

1. Критерий оптимальности.

В общем случае критерий оптимальности L описывается с помощью интегрального функционала вида

$$L = \int_0^{t_c} \varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) dt, \quad (4)$$

где t_c – время, в течение которого осуществляется управление рассматриваемым процессом или объектом. \bar{Z} – вектор, координаты которого характеризуют состояния объекта, в качестве таковых могут рассматриваться показатели качества продукции и др.; \bar{Y} – вектор управляющих воздействий, координаты которого определяют значения различных режимов параметров, задаваемых по каналам управления; \bar{X} – вектор возмущений или неуправляемых факторов, в качестве которых могут рассматриваться характеристики состава и свойств сырья, используемых ингредиентов и др.

Выбор функции $\varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ осуществляется в зависимости от конкретных условий и требований рассматриваемого производства и обуславливает тип системы управления.

В частности, если положить, что $\varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) = 1$, исходный функционал (4) принимает вид

$$L = \int_0^{t_c} dt = t_c. \quad (5)$$

Налагая на полученный вариант критерия оптимальности условие

$$L = t_c \rightarrow \min, \quad (6)$$

получим систему, являющуюся оптимальной по быстродействию, т.е. обеспечивающую минимум времени управления.

Если подынтегральная функция $\varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ содержит только величину $\bar{Z}(t)$, то критерий оптимальности вырождается в соответствующий интегральный критерий качества переходного процесса, используя который можно оптимизировать динамические свойства системы.

Варьируется выражением $\varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$, можно получать варианты управления по минимуму расхода энергии, материальных ресурсов, осуществлять оптимизацию качества продукции и др.

Рассмотрение различных аспектов выбора критерия оптимальности применительно к специфике задач управления в пищевой и мясомолочной отраслях промышленности и, в частности, управления качеством продукции достаточно подробно осуществлено в литературе [4, 8, 9].

2. Модель объекта (процесса).

В общем виде под моделью объекта подразумевается математическое описание взаимосвязи между входными и выходными координатами в виде

$$\bar{Z} = F(\bar{X}; \bar{Y}), \quad (7)$$

где \bar{Z} – вектор выходных координат; \bar{X} – вектор неуправляемых воздействий (возмущений); \bar{Y} – вектор управляющих воздействий (управлений).

В каждом конкретном случае зависимость вида (7) может быть реализована в виде системы уравнений, набора передаточных функций и др.

В зависимости от конкретно решаемой задачи разработчику необходимо выбрать вид модели (статическая, динамическая, стохастическая и др.), которая наилучшим образом позволит учесть цель и специфику процесса управления конкретным объектом.

Среди многообразия возможных вариантов построения моделей можно выделить следующие, являющиеся наиболее распространенными:

Получение математической модели аналитическим путем.

В этой ситуации взаимосвязь между интересующими координатами выводится на основании анализа явлений и процессов, лежащих в основе работы исследуемого объекта.

Если объект является достаточно сложным, т.е. состоит из отдельных звеньев, то предварительно необходимо составить его структурную схему и разработать модели соответствующих звеньев. В этом случае математическое описание может быть получено на основании исходных моделей звеньев с использованием правил преобразования структурных схем.

Общая теория этого раздела, соответствующие методики и примеры изложены в литературе [1-5].

Получение математической модели экспериментальным путем.

В этом случае математическая модель получается на основании информации о значениях интересующих параметров, координат, полученных экспериментальным путем при исследовании объекта.

Наиболее часто встречаются следующие ситуации:

а) Определение динамических (статических) характеристик объекта путем подачи на его вход типовых сигналов-возмущений (в виде единичного импульса – $\delta(t)$, единичного ступенчатого воздействия – $1(t)$, гармонического сигнала и др.). Измеряя и анализируя реакцию объекта (выходную координату) соответственно в виде функции веса, переходной и частотной характеристик можно получить его модель, например, в виде передаточной функции.

Обоснование этого метода и необходимые методические рекомендации изложены в [1, 2, 4, 5]. С решением подобных задач студенты сталкивались на предыдущих этапах обучения, например, при изучении дисциплин «Теория автоматического управления» и «Автоматизация технологических процессов и производств».

б) Построение математических моделей с использованием методов пассивного и активного эксперимента.

При проведении пассивного эксперимента необходимая информация о свойствах объекта по интересующим координатам собирается в процессе его нормальной эксплуатации. При этом возможности проведения исследований и моделирования свойств объект в экстраординарных условиях или

расширенных, относительно номинальных диапазонов изменения координат, не представляются, так как это может привести к появлению партий брака.

Наоборот, при проведении активного эксперимента исследователь имеет возможность варьировать значениями координат в интересующих его диапазонах и по требуемому плану. При этом необходимо иметь в виду, что, несмотря на относительно меньший объем такого эксперимента, его стоимость оказывается более высокой.

Теоретические основы и методические рекомендации по реализации таких методов построения моделей изложены в [4, 8, 10]. Для обработки экспериментальных данных целесообразно воспользоваться пакетами прикладного ПО: MATLAB, Simulink и др. [6, 7].

в) Описание свойств объекта с помощью имитационных моделей.

Имитационные модели эффективно используются в тех ситуациях, когда координаты объекта не могут быть адекватно представлены с помощью детерминированных функций, т.е. содержат элементы случайностей. В этом случае описание координат целесообразно осуществлять с помощью различных вероятностных характеристик. Соответственно оценки разных состояний поведения объекта могут быть сделаны «по вероятности». А соответствующие прогнозы, полученные с использованием таких моделей, следует расценивать как наиболее вероятные из различных возможных ситуаций. Необходимым элементом для описания координат различных объектов с помощью имитационных моделей является генерирование последовательностей случайных величин с различными законами распределения. Для реализации этих задач также целесообразно использовать соответствующие пакеты вышеупомянутого ПО. Общетеоретические положения, основные приемы построения таких моделей и практические рекомендации по их использованию изложены в литературе [1, 11, 12].

3. Ограничения.

С помощью ограничений задаются области варьирования переменных (координат объекта) при отыскании оптимального управления. В общем случае ограничения задачи могут быть представлены в виде

$$Q_i(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) \leq 0, i \in I. \quad (8)$$

В частности, при постановке задачи оптимального управления различными промышленными объектами широко используются ограничения в виде

$$y_i(\min) \leq y_i \leq y_i(\max), i \in I, \quad (9)$$

где $y_i(\min)$ и $y_i(\max)$ – минимальные и максимальные возможные значения изменения y_i -ого управляющего воздействия в процессе управления. Так, например, в качестве $y_i(\min)$ и $y_i(\max)$ могут быть выбраны минимальные и максимальные значения режимных параметров (температур, расходов, давлений и т.п.), реализуемых на конкретном объекте. Значения $y_i(\min)$ и $y_i(\max)$ берутся из паспортных данных объекта либо определяются экспериментально.

Другим, частным, случаем ограничений могут служить ограничения, накладываемые на выходные координаты объекта \bar{Z} (показатели качества) в процессе управления. В этом варианте частным требованием к управлению является получение продукции с заданными свойствами, т.е. показатели качества которого z_j удовлетворяют условно

$$z_j(\min) \leq z_j \leq z_j(\max), j \in G. \quad (10)$$

Величины $z_j(\min)$ и $z_j(\max)$, задающие требования к качеству продукции, определяются из соответствующих стандартов, нормативной и технологической документации. Методические рекомендации и примеры выбора ограничений изложены в литературе [4, 9, 10].

4. Начальные условия.

Начальные условия характеризуют состояние объекта в начале процесса управления, т.е. при $t = 0$. Обычно представляются в виде

$$\bar{X}(0); \bar{Y}(0); \bar{Z}(0). \quad (11)$$

Таким образом, совокупность блоков 1-4 представляет собой математическую формулировку задачи оптимального управления в общем виде. После постановки задачи можно приступить к следующему этапу – отысканию решения. Начиная этот этап, необходимо выбрать метод. При выборе метода решения следует учитывать специфику задачи, ее особенности. Основные методы решения следующие.

а) Классические методы вариационного исчисления. Эти методы основаны на использовании уравнений Эйлера-Лагранжа. Согласно основным теоремам вариационного исчисления, если решение задачи оптимального управления существует, то оно является решением дифференциального уравнения Эйлера-Лагранжа. Исходя из этого положения, производится отыскание решения. Варианты поиска решения зависят от особенностей задачи. Часто встречаются ситуации, в которых имеются так называемые естественные граничные (начальные) условия или они не заданы – условия трансверсальности. Практическая реализация таких

методов в реальных ситуациях, когда условия (5), (7), (8) представлены достаточно сложными выражениями, является довольно трудоемкой процедурой, а в ряде случаев не разрешимой. Поэтому при решении реальных практических задач эти методы широкого распространения не получили. Общая теория вариационного исчисления, методы решения различных вариантов изложены в литературе [13-14].

В настоящее время для решения прикладных задач разработаны частные методы, которые могут быть достаточно просто реализованы с использованием ЭВМ. Среди них наибольшее распространение получили методы линейного программирования и динамического программирования – метод Р. Беллмана.

б) Методы линейного программирования предназначены для решения задач оптимального управления в том случае, когда условия задачи (1) – (4) представлены набором линейных уравнений и неравенств. В этом случае отыскание оптимального решения (или оптимального плана задачи) может быть осуществлено известными методами, например, с помощью широко распространенного симплекс метода. Для реализации этих методов в составе прикладного программного обеспечения современных ЭВМ имеются пакеты специальных программ. Описание методов линейного программирования, особенности их реализации, соответствующие алгоритмы приведены в литературе [14-16].

в) Динамическое программирование также является методом решения задач оптимального управления. Метод предназначен для систем, у которых состояние не зависит от предыстории системы, а определяется только ее начальными условиями. Решение задачи распадается в этом случае на ряд этапов, для каждого из которых осуществляется отыскание оптимального решения исходя из принципа оптимальности Р. Беллмана. Одним из достоинств этого метода является возможность его реализации на ЭВМ. Описание метода, его алгоритмизация и соответствующие примеры приведены в литературе [1, 2, 14].

г) Следует отметить, что кроме указанных методов существуют и другие: методы нелинейного программирования, принцип максимума Л.С. Потрягина, различные методы нахождения экстремумов функций. Выбор метода решения в каждой конкретной ситуации зависит от специфики решаемой задачи и требований, предъявляемых к процедуре ее решения.

3. Рекомендации по определению параметров режимов автоколебаний в нелинейных системах

Режим автоколебаний является одним из рабочих режимов нелинейной САУ. Одной из основных причин нелинейности систем в

биотехнологической промышленности является наличие широко используемых различных вариантов релейных регуляторов. Наиболее часто разработчиков таких систем интересуют следующие параметры возможных автоколебаний, которые могут существовать в системе: A – амплитуда и ω_a – частота автоколебаний. Эти параметры характеризуют точность поддержания регулируемой величины и частоту срабатывания исполнительного устройства, соответственно. Частота срабатывания исполнительного устройства обуславливает показатели надежности системы (например, среднее время безотказной работы), т.к. любое исполнительное устройство рассчитано на определенное, ограниченное число срабатываний.

Определение указанных параметров, помимо графоаналитического метода, может быть осуществлено с помощью метода гармонической линеаризации в различных модификациях. Суть метода состоит в том, что нелинейное звено, входящее в контур САР, заменяется условно линейным по балансу первой гармоники, которая и определяет параметры процесса автоколебаний. Другими словами, делается предположение, что линейная часть системы является фильтром нижних частот, подавляет прохождение остальных гармонических составляющих входного сигнала. Пренебрежение остальными возможными гармониками обуславливает приближенность метода. Линеаризация нелинейного звена осуществляется с помощью т.н. коэффициентов гармонической линеаризации, которые фактически являются коэффициентами передачи для гармоники. Они вычисляются через коэффициенты ряда Фурье и для типовых нелинейностей – табулированы и приведены в соответствующей литературе, например, в [2, 3, 5].

Методика исследования автоколебаний, в общем виде, будет состоять в следующем. Нелинейное звено, входящее в контур САР, заменяется условно линейным с помощью коэффициентов гармонической линеаризации. При этом сами коэффициенты, в общем случае, являются нелинейными функциями искомых величин: A и ω_a . Теперь, существование в нелинейной системе режима автоколебаний соответствует нахождению линеаризованной системы на «колебательной» границе устойчивости. Из этого условия с помощью известных критериев (Михайлова, Рауса - Гурвица, Найквиста) определяются параметры (A и ω_a) возможных автоколебаний. Процедура нахождения решения может быть осуществлена различными методами: графическим, методом последовательных приближений и др. После нахождения решения необходимо проверить устойчивость автоколебательного режима и состоятельность применения метода: является ли линейная часть системы фильтром найденной гармоники ω_a . То есть справедливость применения метода определяется в конце решения задачи. В противном случае, хотя это еще однозначно не означает неправильности полученного решения или отсутствия в системе автоколебаний, требуется

дополнительная проверка каким-либо другим методом, например, на основе исследования фазового портрета системы.

Практические рекомендации, возможные ограничения по применению метода и соответствующие примеры приведены в [2-5].

4. Выбор и реализация подходов и алгоритмов по организации мониторинга и управления в условиях неопределенности.

Актуальность таких разработок имеет возрастающую тенденцию в связи с повышением требований к качеству и эффективности процессов мониторинга и управления, а также интеллектуализации этих процессов. Здесь необходимо отметить следующее. Понятие «состояние неопределенности» является общим и может иметь различные подоплеку и природу возникновения. В задачах интеллектуального анализа возникновение состояний неопределенности может быть обусловлено следующими обстоятельствами [1, 17-19]:

- несогласованностью и противоречивостью мнений экспертов;
- неполнотой «баз знаний»;
- недостоверностью или «нечеткостью» исходных данных;
- наличием различных приоритетов и «предпочтений» при принятии решений;
- наличием различных вариантов или компонентов целевых функций и др.

Наряду с вышеприведенными обстоятельствами, при организации мониторинга и управления рядом объектов и процессов в биотехнологической, химической, металлургической и др. отраслей промышленности, специфическими причинами возникновения состояний неопределенности могут являться [4, 9, 17]:

- «дефицит» исходной информации (априорная неопределенность). Причинами этого состояния могут являться сложность, дороговизна и большие затраты времени для организации и проведения отдельных измерений, например, параметров состава и свойств сырья, ингредиентов, готовой продукции. Следствием чего является возникновение «нечеткости», неопределенности информационного потока, используемого для оценки состояния объекта и выработки управляющих воздействий.

- разброс или рассеяние ряда параметров, например, состава и свойств различных сред во время протекания отдельных технологических операций или в рабочем объеме соответствующих аппаратов или оборудования. В качестве примера можно указать неоднородность распределения температур, влажности и др. параметров в объемах холодильных камер или камер для выпечки хлебобулочных изделий, термообработки различных видов

продукции. Наличие таких состояний неопределенности порождает неопределенность прогнозов по качеству обработки изделий и организации управления соответствующими объектами.

Анализ состояний неопределенности позволяет повысить качество мониторинга и управления различными объектами и процессами.

Для синтеза алгоритмов исследований и принятия решений целесообразно и важно, чтобы мера состояний неопределенности поддавалась численному определению. Однозначного решения такой проблемы не существует. Имеются альтернативные подходы и направления со своими возможностями и особенностями. Ниже дается краткий обзор существующих теорий и методов, нашедших применение для решения такой проблемы [1, 17, 19, 20].

1. Методы спектрального и корреляционного анализа, основанные на рассмотрении функций спектральной плотности – $S_x(\omega)$ и автокорреляционной функции – $R_x(\tau)$ анализируемого параметра.
2. Методы интервальных оценок.
3. Методы статистического моделирования и стохастической аппроксимации.
4. Методы теории эллиптического оценивания.
5. Методы теории нечетких множеств, основанные на использовании функций принадлежности для описания состояний неопределенности (*fuzzy logic*).
6. Методы робастного оценивания, основанные на использовании статистических характеристик, теории чувствительности, теории инвариантности и др.
7. Методы, основанные на использовании экспертных систем и соответствующих баз знаний (*knowledge based systems*).
8. Методы, основанные на технологиях искусственных нейронных сетей (*artificial neural networks*).
9. Методы эволюционного моделирования, основанные на синтезе процессов естественной эволюции системы по ожидаемым сценариям с помощью ЭВМ.
10. Методы, основанные на использовании когнитивных информационных технологий. В них используются различные процедуры отображения объемных и многомерных информационных массивов в образные когнитивные представления. Эти образы

создаются с использованием компьютерной графики, являются наглядными, удобными для восприятия и принятия решений в трудно формализуемых ситуациях.

11. Байесовские интеллектуальные технологии (БИТ) и сети. БИТ это совокупность методов анализа объектов на основе статистических процедур исследования априорных и апостериорных данных. Байесовские сети являются одной из моделей «баз знаний» на основе вероятностных характеристик.
12. Методы теории энтропийных потенциалов (ТЭП). Величины энтропийных потенциалов являются унифицированными, объективными при описании состояний неопределенности и, что весьма важно, представляются вещественными числами. ТЭП и ее методы могут использоваться в качестве «инструментов» при реализации большинства выше упомянутых подходов для описания состояний неопределенности.

Каждый из перечисленных подходов имеет свои достоинства, области и перспективы применения. В значительной мере адаптированным к вышеуказанной специфике биотехнологической и ряда смежных, по сути природы возникновения состояний неопределенности, отраслей промышленности является подход, основанный на использовании методов и технологий ТЭП [20, 21]. В основу создания ТЭП и была положена, в качестве одной из целевых задач, – возможность организации мониторинга и управления в условиях априорной неопределенности, например, обусловленной «дефицитом» измерительной информации. В результате был разработан набор понятий энтропийных потенциалов (ЭП) на основе принципа «вложения», адаптированных к различной специфике задач. С использованием этих понятий представляется возможным получать портреты изменения состояний неопределенности различных объектов и систем, которые являются информативными, наглядными и удобными для проведения мониторинга и организации управления.

Ниже излагаются основные положения ТЭП и методические аспекты использования ее методов для организации управления.

Описание состояний неопределенности какого-либо параметра x может быть осуществлено на основе величин понятий энтропийного потенциала (ЭП) - Δ_e и комплексного энтропийного потенциала (КЭП) - L_Δ , взаимосвязь между которыми описывается выражением

$$L_{\Delta} = \frac{\Delta_e}{|X_n|} = \frac{K_e \sigma}{|X_n|}. \quad (12)$$

В выражении (12) дополнительно задействованы следующие характеристики параметра: σ - величина среднего квадратического отклонения (СКО), K_e – величина энтропийного коэффициента, X_n - величина базового значения, на «фоне» которого анализируется его состояние неопределенности. Величина СКО представляет среднее отклонение параметра от его математического ожидания m . Величина K_e характеризует вариативные свойства закона распределения параметра, предсказуемость появления различных его значений. Для реальных законов распределения значения величины энтропийного коэффициента находятся в пределах

$$1 \leq K_e \leq 2.07.$$

В «классическом» изложении, величина ЭП определяется как половина диапазона варьирования распределения с законом равномерной плотности, имеющего такую же энтропию H_x , как и конкретный закон распределения рассматриваемого параметра. Таким образом, осуществляется «унификация» описания вариативных свойств анализируемого закона распределения параметра на основе интервала неопределенности закона равномерной плотности при равенстве энтропий этих законов. Величина ЭП имеет размерность анализируемого параметра, так же, как и величина СКО. Исходя из этого, была описана взаимосвязь между этими величинами на основе понятия величины энтропийного коэффициента в виде

$$\Delta_e = \frac{1}{2} e^{H_x} = K_e \sigma, \quad (13)$$

где $H_x = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx$ - энтропия анализируемого параметра x , а $p(x)$ - его плотность распределения вероятности.

В настоящее время разработаны методы определения значений величин K_e для различных ситуаций с исходными данными, а также значения этих коэффициентов для ряда типовых законов распределений [20-22].

Величина L_{Δ} является безразмерной и может использоваться в качестве критерия подобия различных состояний неопределенности. Введение величины L_{Δ} позволяет осуществить описание состояний неопределенности единым комплексом, основанным на использовании вышеупомянутых характеристик вариативных свойств параметра. Возможен и обратный переход, путем упрощения модели состояния неопределенности. Например, если пренебречь изменениями базового значения и вида закона распределения при исследовании неопределенности параметра, т. е. считать, что $X_n - const$ и $K_e - const$ -то величина L_{Δ} вырождается в масштабное изображение величины СКО.

В общем случае может возникнуть необходимость оценки состояния неопределенности объекта по нескольким параметрам – m . Таковыми, например, могут являться температура, влажность, концентрация отдельных газов в рабочих объемах климатических камерах, камер для дефростации сырья или тепловой обработки различной продукции и других. Для описания подобных состояний неопределенности в ТЭП введено понятие многомерного комплексного энтропийного потенциала (МКЭП) - La_z , позволяющего оценить состояние неопределенности объекта в \mathbf{R}^m .

$$\begin{aligned}
 La_z &= \left(\sum_{i=1}^m \left(c_i |L_{\Delta i}| \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} = \left(\sum_{i=1}^m \left(c_i \frac{\Delta_{ei}}{|X_{ni}|} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} = \\
 &= \left(\sum_{i=1}^m \left(c_i \frac{K_{ei} \sigma_i}{|X_{ni}|} \right)^z \right)^{\frac{1}{z}} ; i = 1, 2, \dots, m.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

В выражении (14) введены коэффициенты значимости состояния неопределенности каждого отдельного параметра – c_i , ($i=1,2,\dots,m$). Значения этих коэффициентов характеризуют «вес» соответствующих составляющих состояний неопределенности параметров для конкретного технологического объекта или процесса. Определение значений c_i может осуществляться

различными способами: директивно, на основании экспертных оценок, аналитически и др. При этом на значения величин коэффициентов налагаются следующие ограничения

$$c_i \geq 0; \sum_{i=1}^m c_i = 1; (i=1,2,\dots,m). \quad (15)$$

Значение параметра z в выражении (14) определяет вариант МКЭП ($z=1, 2, \dots$). На практике обычно используют вариант $z=1$, соответствующий линейной форме или вариант $z=2$, соответствующий квадратичной форме от величин КЭПов. Имеет место соотношение: $La_1 \geq La_2$. Равенство имеет место при $m=1$. Рекомендации по выбору вариантов La_z , в конкретных ситуациях, примеры и расчеты приведены в [17, 19, 20].

В [21] показана эффективность применения изложенного подхода на примере исследования изменений неоднородности температурного поля в объеме холодильной камеры на основе величины ЭП- Δ_e . В процессе холодильного хранения продукции значение уставки регулятора температуры оставалось неизменным. Основными возмущениями температурного режима в объеме камеры являются притоки наружного воздуха, возникающие при открывании люков в процессах загрузки и выгрузки, а также притоки тепла, вносимые массами поступающей продукции. Наличие этих возмущений, интенсивность которых обусловлена производственной активностью, создает состояния неопределенности при поддержании температурного режима. На рис. 1 приведена обобщенная траектория, описывающая изменение состояний неопределенности температурного режима камеры в пространстве основных характеристик (σ, K_e) , образующих плоскость ЭП. Исследования производились в течение производственного цикла, равного 16 часам, который был разбит на 8 этапов каждый длительностью по 2 часа. Последовательности этапов соответствуют пронумерованные точки ($n=1,2,\dots,8$), соединенные для наглядности пунктирной кривой. На первом, начальном этапе, загрузок и выгрузок продукции не производилось, поддержание температурного режима осуществлялось с использованием 2-х позиционного закона регулирования в режиме автоколебаний, характеристики которого определяются, в основном, параметрами первой гармоники. В этом случае для описания плотности распределения значений температур может быть использован арксинусоидальный закон распределения с $K_e \approx 1.11$. Значение величины σ зависит от установленного на регуляторе диапазона регулирования. На втором этапе, с целью уменьшения

частоты автоколебаний, была осуществлена перенастройка регулятора за счет увеличения диапазона регулирования. В результате изображающая точка переместилась в положение 2, которое соответствует большему значению величины σ , практически при том же значении величины $K_e \approx 1.11$.

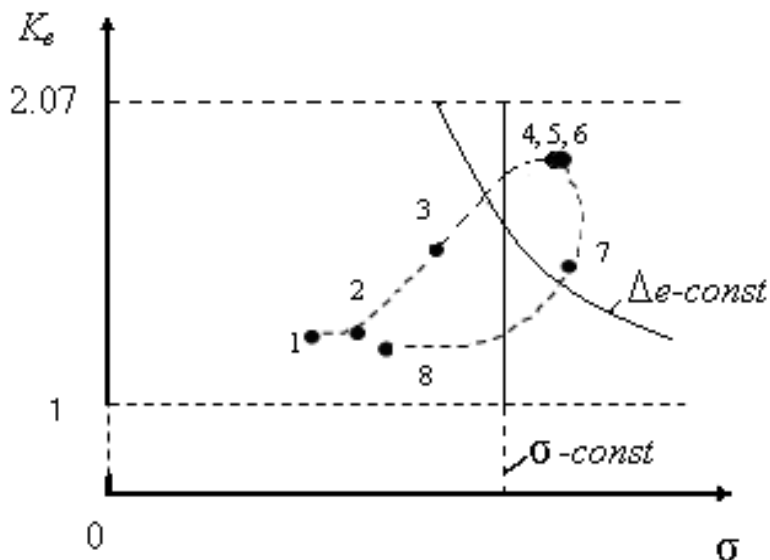


Рис. 1. Траектория изменений состояний неопределенности температурного режима в камере.

С нарастанием производственной деятельности, проявление вышеуказанных возмущений привело к изменениям характера процесса регулирования в сторону «ухудшения предсказуемости» появлений тех или иных значений температуры, а также к увеличению их разброса. Значения K_e и σ – возросли: изображающая точка переместилась в положение 3. На последующих этапах (4, 5, 6) имело место «стационарности» режима загрузки и выгрузки продукции, значения величин K_e и σ изменялись не значительно. Это позволило объединить соответствующие точки в один кластер. «Затухание» производственной деятельности на следующем этапе привело к понижению уровня состояния неопределенности, характеризующегося координатами точки 7. Завершение цикла соответствовало приближению к исходному состоянию 1, характеризующегося координатами точки 8.

Стабилизация состояния неопределенности температурного режима в камере на основе величины ЭП будет описываться условием $\Delta_e = K_e \sigma = const$, что в геометрическом представлении иллюстрируется перемещением изображающей точки по соответствующей кривой. Эта кривая называется линией постоянного энтропийного потенциала или изотропой, она также показана на рис. 1. С учетом изложенного, требование к качеству поддержания состояния неопределенности температурного режима будут описываться неравенством вида $\Delta_e \prec \Delta_{e(max)}$, где $\Delta_{e(max)}$ - предельно допустимое значение величины ЭП температуры. Этому условию соответствует область в пространстве параметров ЭП, находящаяся левее изотропы $\Delta_{e(max)} = const$.

Управление качеством процесса регулирования температуры может быть осуществлено различными способами, например, путем целенаправленного изменения величины СКО - σ . Другим путем является изменение закона распределения значений в процессе регулирования. Способы решения подобных задач рассмотрены в [17, 20]. В данном случае, «деформация» траектории состояния неопределенности температурного режима с целью попадания ее в область допустимых состояний $\Delta_e \prec \Delta_{e(max)}$, может быть осуществлена, например, за счет уменьшения влияния указанных возмущений, путем модернизации объекта управления. Решением может являться установка шлюзового отсека перед загрузочным люком. Другим решением может являться изменение диапазона регулирования регулятора. При использовании функциональных регуляторов количество настроечных параметров может увеличиться. При изменении настроечных параметров будет изменяться передаточная функция всей системы, а, следовательно, и условия прохождения возмущений через систему. Это обстоятельство приведет к изменению значений координат изображающих точек, что, в конечном счете, и обусловит «деформацию» всей траектории.

Значение величины $\Delta_{e(max)}$ определяется требованиями к качеству хранения продукции. Для конкретных видов продукции и ситуаций, предельно-допустимые значения величин энтропийных потенциалов могут быть определены на основании аналитических исследований, на основании экспертных оценок и других. Если пренебречь изменением закона распределения температуры в процессе регулирования (т.е. полагать, что $K_e = const$), то изотропа $\Delta_e = const$ вырождается в прямую линию: $\sigma = const$. В этом случае требование к качеству поддержания температуры сведется к ограничению величины ее дисперсии.

В приведенном примере рассмотрено состояние неопределенности температуры, в процессе ее регулирования, в одной точке. Используя изложенный подход можно оценить состояние неопределенности температуры в объеме камеры. В этом случае будет анализироваться разброс значений температуры в различных точках рабочего объема. Причинами неоднородности температурного поля могут являться притоки наружного воздуха, возникающие при загрузке или выгрузке продукции, неравномерность складирования продукции и другие. Управление состоянием неопределенности, в этом случае, может быть осуществлено путем включения вентиляторов, осуществляющих принудительную циркуляцию воздуха в камере.

Величина Δ_e имеет размерность анализируемого параметра и фактически характеризует «унифицированный», на основе понятия энтропии, интервал его варьирования. Так, например, уместен вопрос: $\Delta_e = 5^{\circ}\text{C}$, много это или мало? Для ответа на этот вопрос необходимо знать базовое значение температуры, на фоне которого рассматривается состояние неопределенности. Так, если речь идет о холодильной камере, в рабочем объеме которой требуется поддерживать температуру равную -3°C , то наличие такого уровня состояния неопределенности является неприемлемым и приведет к порче продукции. Если же речь идет о печи для выпечки хлебобулочных изделий, где значение температуры энергоносителя (паровоздушной смеси) превышает 200°C , то такой уровень состояния неопределенности является вполне допустимым. В таких ситуациях, оценку состояния неопределенности параметра целесообразнее осуществлять с использованием величины КЭП на основе выражения (12). Соответственно, условие $L_{\Delta} = const$ будет определять не кривую, а поверхность постоянного комплексного энтропийного потенциала в пространстве координат: σ, K_e, X_n . Вышеупомянутая изотропа будет являться «сечением» этой поверхности плоскостью: $X_n = const$.

Если ставится задача оценки состояния неопределенности температурно-влажностного режима газовой среды камеры по этим двум параметрам, то необходимо использовать величину МКЭП на основе выражения (14). Более подробно эти вопросы рассмотрены в работах [20, 23, 24].

Следует отметить, что использование понятий энтропийных потенциалов позволяет также определить количество информации, порождаемой изменением состояний неопределенности анализируемых параметров на отдельных этапах. Другими словами, исследовать информационный «след» системы, порождаемый, например, в результате ее

естественной эволюции или в результате внесения каких-либо управляющих воздействий [17, 25]. Информационные технологии получают все большее распространение при организации управления объектами и системами различной природы [9, 26, 27].

На основе понятия ЭП представляется возможным осуществить переход к информационному портрету. В основу этого положены следующие соображения [17, 20, 25].

Пусть состояния неопределенности системы по какому-либо параметру x на двух последовательных этапах характеризуются значениями величин энтропийных потенциалов Δ_{e1} и Δ_{e2} . Тогда изменение этого состояния можно охарактеризовать отношением этих величин ЭП, которое с учетом (13) примет вид

$$\frac{\Delta_{e1}}{\Delta_{e2}} = \frac{\frac{1}{2}e^{H_{x1}}}{\frac{1}{2}e^{H_{x2}}} = e^{H_{x1} - H_{x2}} = e^I, \quad (16)$$

где $I = H_{x1} - H_{x2}$, количество информации, «порожденное» изменением состояния неопределенности параметра при переходе с одного этапа на другой.

Из выражения (16) следует

$$I = \ln \frac{\Delta_{e1}}{\Delta_{e2}} = \ln \frac{K_{e1} \sigma_1}{K_{e2} \sigma_2} = \ln \frac{K_{e1}}{K_{e2}} + \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \ln k_{ke} + \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = I_I + I_P, \quad (17)$$

где $k_{ke} = \frac{K_{e1}}{K_{e2}}$ - коэффициент преобразования закона распределения параметра. Методы определения значений величины k_{ke} изложены, например, в [20]. В выражении (17) также использованы обозначения: $I_I = \ln k_{ke}$ - интеллектуальная составляющая информации, $I_P = \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ - энергетическая составляющая информации [17, 25]. В основу выбора названий положены

следующие соображения. Величина k_{ke} характеризует изменение свойств закона распределения параметра, что является одним из факторов рассмотрения и учета в задачах интеллектуального анализа. Поэтому слагаемое $\ln k_{ke}$ следует трактовать, как интеллектуальную составляющую. Величина СКО характеризует усредненную мощность всего спектра гармоник динамической составляющей параметра. $\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega$, где

$S(\omega)$ – функция спектральной плотности центрированной составляющей, которая описывает распределение среднего значения мощности случайного процесса по гармоникам. Ее следует рассматривать как энергетическую составляющую информационного процесса.

Согласно (16) и (17) величина I может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения имеют место, когда переход к последующему этапу характеризуется возрастанием состояния неопределенности параметра ($H_{x1} < H_{x2}$) и, наоборот [20]. Исходя из того, что реальный диапазон изменения величины K_e находится в пределах $1 \leq K_e \leq 2.07$, можно определить максимально-возможное значение интеллектуальной составляющей информации $I_I(max)$.

$$I_I(max) = \ln k_{ke}(max) = \ln \frac{K_e(max)}{K_e(min)} = \ln 2.07 \approx 0.7 \text{ [нит]}. \quad (18)$$

Из (18) следует

$$0 \leq |I_I| \leq \ln 2.07 \text{ [нит]}. \quad (19)$$

Единицы измерения количества информации и энтропии определяются основанием используемых логарифмов в выражениях (13), (17) и (18). Например, при использовании натуральных логарифмов количество информации получается в натуральных единицах – нит, при использовании двоичных логарифмов – в двоичных единицах или битах, при использовании десятичных логарифмов – в дитах. Соотношение между различными единицами измерения осуществляется на основании зависимости для перехода между логарифмами с различными основаниями. Для упомянутых единиц измерения соответствующие зависимости будут иметь вид

$I_{\text{нит}} \approx 1.45 \text{бит} \approx 0.43 \text{дит}$.

Верхний диапазон изменения σ не имеет ограничений. Отсюда следует

$$0 \leq |I_P| < \infty. \quad (20)$$

В случае доминирования одной из составляющей информации, модель (17) можно упростить до этой составляющей. Для характеристики соотношения этих компонент в работе [25] была введена специальная величина - коэффициент соотношения информации η

$$\eta = \frac{|I_P|}{|I_I|}. \quad (21)$$

Из (19) и (20) можно сделать вывод, что «мощность» множества энергетических моделей превышает мощность множества интеллектуальных моделей. Знаки абсолютных величин необходимы для обеспечения постоянства знака величины η , поскольку величины I_I и I_P , согласно определениям могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Выбор варианта модели необходимо осуществлять исходя из требований к ее адекватности, путем задания граничного уровня значения величины $\eta = C$. Исходя из практического опыта, в качестве такового можно рекомендовать значение C , находящееся в пределах от двух до пяти. Если $\eta \leq 1/C$, то определение величины I следует осуществлять с использованием интеллектуальной модели. Если $\eta \geq C$, задача может решаться с использованием выражения энергетической модели. Если $1/C < \eta < C$, то следует использовать общую модель (17).

Выбор значения величины C может быть осуществлен следующим образом. Определим долю каждой из составляющих информации в общей

сумме их абсолютных величин. Обозначим ее θ и выразим через величину η в следующем виде.

Для величины I_I

$$\theta_I = \frac{|I_I|}{|I_I| + |I_P|} = \frac{|I_I|}{|I_I| + \eta|I_I|} = \frac{1}{1 + \eta}, \text{ или } \eta = \frac{1 - \theta_I}{\theta_I}. \quad (22)$$

Для величины I_P

$$\theta_P = \frac{|I_P|}{|I_I| + |I_P|} = \frac{|I_P|}{\frac{1}{\eta}|I_P| + |I_P|} = \frac{\eta}{1 + \eta}, \text{ или } \eta = \frac{\theta_P}{1 - \theta_P}. \quad (23)$$

Задаваясь уровнем значимости для различных вариантов моделей в виде конкретного значения θ , с использованием выражений (22) и (23), можно определить граничные уровни величины η в виде значений C и $1/C$. Так, например, задавшись 80% уровнем значимости в виде условия $\theta = 0.8$, получим $C = 4$ и, соответственно, $1/C = 0.25$. Предложенный подход имеет наглядную графическую иллюстрацию, представленную на рис. 2. Здесь показаны графики зависимостей величин θ_I и θ_P от величины η . Из изложенных соображений следует, что эти кривые пересекаются в точке с координатами (1.0, 0.5). Уровень значимости полной модели (17) $\theta = \theta_I + \theta_P = 1$ для любых значений величины η . Он изображен на рис. 2 горизонтальной прямой. На рисунке также показан уровень значимости θ_0 , используемый для выбора модели. Абсциссы точек пересечения горизонтальной прямой $\theta = \theta_0$ с графиками зависимостей $\theta_I(\eta)$ и $\theta_P(\eta)$ ($1/C_0$ и C_0) являются значениями границ величины η для выбора вариантов моделей. При $\eta \rightarrow 0$ от точки $1/C_0$, уровень значимости модели I_I возрастает от значения θ_0 , стремясь к 1 или 100%.

Возрастание уровня значимости модели I_P от значения θ_0 до 100% имеет место, когда $\eta \rightarrow \infty$ от точки C_0 .

Выбор варианта модели, в ряде случаев, можно осуществить, используя логику «мажорантных» соотношений, суть которой состоит в следующем.

Для заданного граничного уровня величины $\eta=C$, используя выражения (18, 19, 21), можно записать

$$|I_P| = C|I_I| = C \left| \ln \frac{K_{e1}}{K_{e2}} \right| = C |\ln k_{ke}| \leq C \ln \frac{\max\{K_{e1}, K_{e2}\}}{\min\{K_{e1}, K_{e2}\}}. \quad (24)$$

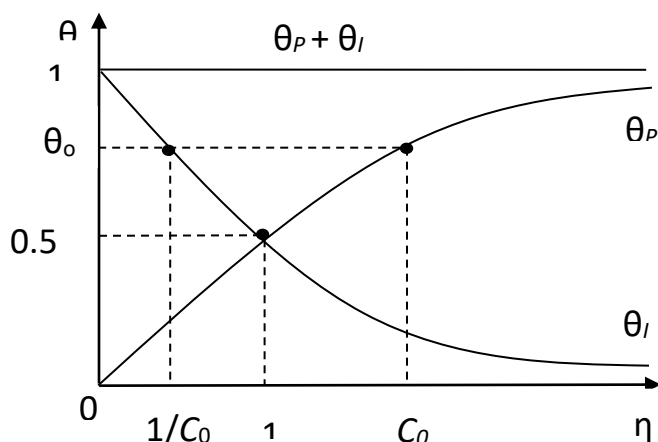


Рис. 2. Уровни значимости информационных моделей.

Определим максимально возможное значение логарифма в правой части выражения (24). Исходя из (18), (19) можно записать,

$k_{ke}^{(max)} = \frac{K_e^{(max)}}{K_e^{(min)}} \approx 2.07$. Введем понятие кратности изменения величины

СКО в виде $k_\sigma = \frac{\max\{\sigma_1, \sigma_2\}}{\min\{\sigma_1, \sigma_2\}}$. Теперь условие для оценки адекватности

варианта информационной модели может быть сформулировано в виде теоремы, доказательство которой приведено в работах [17, 25].

Теорема. Если кратность изменения величины СКО на рассматриваемом этапе - k_σ превышает значение 2.07^C , то, со значением η ,

превышающим C , информационная модель может быть представлена величиной энергетической составляющей информации I_p .

Используя эту теорему, представляется возможным осуществить обоснованный выбор информационной модели в виде I_p . Исходными данными будут являться значение кратности изменения величин СКО на рассматриваемом этапе эволюции параметра и значение величины C . Уровень значимости такой модели, согласно (23), будет превышать величину $\theta_p = \frac{C}{1+C}$. На рис. 3 соответствующее значение θ_p будет находиться на участке кривой $\theta_p(\eta)$, расположенной правее точки C_0 . Получение информации о возможных значениях величины k_σ для конкретного этапа эволюционного процесса параметра может быть осуществлено на основании экспериментальных или аналитических исследований, на основании исследований аналогов. Для ряда типовых ситуаций или штатных режимов эксплуатации конкретных объектов соответствующие значения этой величины могут быть априори вычислены с использованием существующих методик и табулированы [17, 20, 21].

Полученные варианты информационных моделей также могут быть трансформированы и адаптированы к конкретной специфике их использования.

Выбор варианта модели может быть осуществлен не только на основе коэффициента соотношения информаций. Например, выбор может быть осуществлен на основе анализа явлений, определяющих функционирование системы, на основе опытно-интуитивного восприятия ситуаций, на аналогиях с подобными системами и др.

Информационные портреты также как и портреты систем в пространстве характеристик ЭП являются информативными и позволяют наглядно проиллюстрировать изменение их состояний неопределенности, что создает предпосылки для организации робастного управления [4, 17].

Использование таких портретов позволяет минимизировать затраты на получение и обработку данных, которые необходимы для оценки изменений состояний неопределенности. Объем данных, требующийся для получения представительных оценок величин СКО, примерно на порядок меньше объема данных, необходимых для построения гистограмм, определения функций $p(x)$ и вычисления соответствующих величин энтропий. Значения величин энтропийных коэффициентов также могут быть определены на основании ограниченного объема данных, с помощью специально разработанных методов [4, 20, 22].

Для иллюстрации изложенного подхода, на рис. 3 показана траектория, характеризующая изменение состояния неопределенности температурного поля в вышерассмотренном примере в информационном пространстве. Эту траекторию можно трактовать, как информационный «след» изменения состояния неопределенности температурного поля в камере [21]. Определение количества информации, порожденной изменением состояния неопределенности при переходе к каждому из последующих этапов, производилось на основании модели (17). Первый этап - начало производственного процесса, которому предшествовало приблизительно такое же состояние неопределенности температурного поля, следовательно, $\Delta_{e1} \approx \Delta_{e0}$. Поэтому $I_{0-1} \approx 0$. Характеристики состояний неопределенности температурного режима на этапах 4, 5 и 6 изменялись не значительно ($\Delta_{e4} \approx \Delta_{e5} \approx \Delta_{e6}$), то из (17) следует, $I_{4-5} \approx I_{5-6} \approx 0$. На рис. 3 видно, что $K_{e1} \approx K_{e2}$, следовательно, $I_1 = \ln \frac{K_{e1}}{K_{e2}} \approx 0$. Поэтому согласно (17) можно записать

$$I_{1-2} \approx I_P = \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}. \text{ То есть величину информации, порожденной изменением}$$

состояния неопределенности температурного поля на этом интервале времени, можно определять по величине энергетической составляющей.

Также имеет место $\sigma_6 \approx \sigma_7$. Следовательно, $I_P = \ln \frac{\sigma_6}{\sigma_7} \approx 0$. Согласно (17),

$$I_{6-7} \approx I_I = \ln \frac{K_{e6}}{K_{e7}}. \text{ Следовательно, величина информации, в данном случае,}$$

может быть определена по величине интеллектуальной составляющей. Приведенный «информационный след» характеризует динамику изменения состояний неопределенности температурного поля, является альтернативой портрета, приведенного на рис. 1. С увеличением состояния неопределенности величина I принимает отрицательные значения и, наоборот. Вышерассмотренный пример по организации управления состояниями неопределенности с использованием портрета в пространстве характеристик ЭПов может быть также проиллюстрирован с использованием информационного следа.

Выбор варианта описания состояний неопределенности в задачах мониторинга и управления зависит от специфики задачи и является прерогативой исследователя. Возможно их совместное использование для повышения наглядности представления результатов.

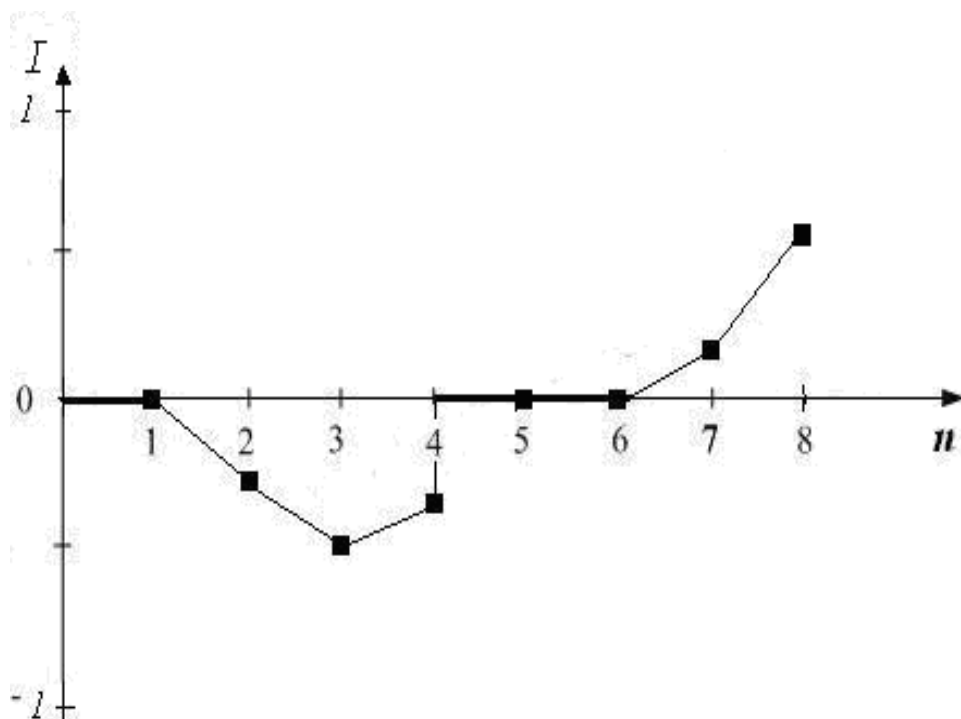


Рис. 3. Траектория изменения состояний неопределенности температурного поля в информационном пространстве.

Получаемые характеристики состояний неопределенности являются компактными, информативными и обладают удобством восприятия. Информационные и энтропийные портреты позволяют наглядно представлять и исследовать эволюцию состояний неопределенности. Их следует рассматривать, как элементы когнитивной графики, с помощью которых осуществляется «сжатие» исходной информации об эволюции состояний неопределенности. Использование таких методов и подходов позволяет упростить технологии проведения исследований и повысить эффективность организации управления объектами различной природы.

Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова.-М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: Учеб. пособие / А.А. Бобцов, В.О. Никифоров, А.А. Пыркин, О.В. Слита, А.В. Ушаков. СПб., НИУ ИТМО, 2013.

3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
4. Лазарев В.Л. Робастное управление в биотехнологической промышленности. Учебное пособие. - СПб: НИУ ИТМО, 2015. - 196 с.
5. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Наука, 1979. – 512 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB: Учебный курс. - СПб.: Питер, 2002.
7. Говорухин В.Н., Цибулин В.Г. Компьютер в математическом исследовании: Учебный курс. - СПб.: Питер, 2001.
8. Митин В.В., Усков В.И., Смирнов Н.Н. Автоматика и автоматизация производственных процессов мясной и молочной промышленности. – М.: ВО Агропромиздат, 1987. – 240 с.
9. Краснов А.Е., Красуля О.В., Большаков О.В., Шленская Т.В. Информационные технологии пищевых производств в условиях неопределенности. (Системный анализ управления и прогнозирования с элементами компьютерного моделирования) - М.:ВНИИМ, 2001.-496с.
10. Автоматизация технологических процессов пищевых производств./ Под ред. Е.Б. Карпина – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.
11. Павловский Ю. Н., Белотелов Н. В., Бродский Ю. И. Имитационное моделирование; Академия - Москва, 2008. - 240 с.
12. Максимей И. В. Имитационное моделирование сложных систем. В 3 частях. Часть 1. Математические основы; БГУ - Москва, 2009. - 264 с.
13. Гельфанд И.М., Фомин С.В. Вариационное исчисление. – М.: Физматгиз, 1962. – 400 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
15. Гасс С. Линейное программирование - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 2015. - 304 с.
16. Юдин Д. Б., Гольдштейн Е.Г. Линейное программирование. Теория, методы и приложения. - М.: Красанд, 2012. - 428 с.
17. Мягкие измерения и вычисления: под ред. С.В. Прокопчиной. М., Научная библиотека. 2017, в 3-х т., том 1.
18. Интеллектуальные системы автоматического управления. /Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.- 576 с.
19. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006.-410с.
20. Лазарев В.Л. Теория энтропийных потенциалов. Монография. С-Пб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2012.-127с.

21. Лазарев В.Л. Совершенствование управления с использованием характеристик энтропийных потенциалов. Адаптация к специфике биотехнологической промышленности // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 68-73.
22. Электрические измерения неэлектрических величин. А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др./ Под ред. П.В. Новицкого. - Л.: «Энергия», 1975. -576с.
23. Лазарев В.Л., Богданов П.А., Петров М.М., Томсон К.Ю. К вопросу оценки неоднородности свойств и состава сред // Вестник Международной академии холода. 2018. №1. С. 74-80.
24. Лазарев В.Л. Исследование и проектирование многокомпонентных систем в биотехнологической промышленности в условиях неопределенности на основе энтропийных потенциалов показателей качества // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 84-90.
25. Lazarev V.L. Representative information models for monitoring and control in the conditions of uncertainty// XVIII Intern. Confer. "SCM". 2015. IEEE. Pp. 54 – 57. DOI: 10.1109/SCM.2015.7190408.
26. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. – М.: Высш. шк., 2005. – 768 с.
27. Lazarev V.L. Processing of observations on the basis of information criteria // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. Saint Petersburg, Russia. May 25-27, 2016. Publisher: IEEE. Pp. 48–50. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519679.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Рекомендации по синтезу САР	4
2. Оптимизация управления в АСУТП.....	6
3. Рекомендации по определению параметров режимов автоколебаний в нелинейных системах	11
4. Выбор и реализация подходов и алгоритмов по организации мониторинга и управления в условиях неопределенности	13
Список литературы.....	29

Миссия университета – открывать возможности для гармоничного развития конкурентоспособной личности и вдохновлять на решение глобальных задач.

Образовательная программа подготовки магистров «Автоматизация технологических процессов и производств пищевой промышленности» по направлению подготовки 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Целью образовательной программы является подготовка магистров, обладающих знаниями, умениями и навыками для решения задач в области автоматизации и управления процессами и производствами биотехнологической промышленности, а также других отраслей промышленности. В процессе обучения студентам прививаются навыки проведения научных исследований, созданию научных проектов, внедрению полученных результатов на практике. Программа реализуется на факультете низкотемпературной энергетики.

Лазарев Виктор Лазаревич
Травина Евгения Александровна

СИНТЕЗ И РАСЧЕТ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное-методическое пособие

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано в <наименование и юридический адрес типографии>

Редакционно-издательский отдел

Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49