

Авторефер.

Ф 34

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

П. Д. ФЕДУНЕЦ

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ,
ОПТИМАЛЬНЫХ
ПО КОМПРОМИССНЫМ КРИТЕРИЯМ,
ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ОБЪЕКТАМ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.13.07
Автоматическое управление технологическими процессами
(пищевой промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Перечисл. 1984

ОДЕССА — 1974

С/м

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

Одесский технологический институт пищевой промышленности
имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи

П.Д.Федунец

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ОПТИМАЛЬНЫХ ПО
КОМПРОМИССНЫМ КРИТЕРИЯМ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЪЕКТАМ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07

Автоматическое управление технологическими
процессами (пищевой промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

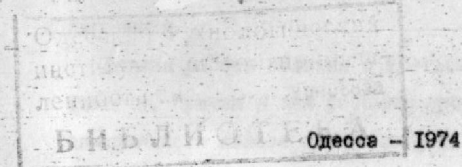
v012358

ОНАХТ 25.05.12

Анализ и синтез сист



v012358



Автор v012358
Ф 34 Федунец П.Д.
Анализ и синтез сист.
1974 8/4

12

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель :

Кандидат технических наук, доцент В.А.Долговязт

Официальные оппоненты :

Доктор технических наук, профессор П.И.Христиченко

Кандидат технических наук, доцент Ю.Н.Митрофанов

Ведущее предприятие - Всесоюзное научно-производственное
объединение "Пищепромавтоматика"

Автореферат разослан " 24 " IX 1974 г.

Защита диссертации состоится " 25 " X 1974 г.

на заседании Ученого Совета факультета автоматизация и приборо-
строения Одесского технологического института пищевой промышлен-
ности имени М.В.Ломоносова.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах)
просим направлять по адресу: 270039 г.Одесса, 39, ул.Свердлова,
112, ОТИПИ им. М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

кандидат технических наук

Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ

Главной задачей девятой пятилетки является обеспечение значи-
тельного подъема материального и культурного уровня жизни совет-
ского народа на основе высоких темпов развития социалистического
производства, повышения его эффективности, научно-технического
прогресса и ускорения роста производительности труда.

Большое значение для выполнения этой задачи имеет дальнейшее
развитие пищевой промышленности. Поэтому директивами XXIV съезда
КПСС предусматривается увеличение производства продукции пищевой
промышленности на 30-35%, дальнейшее повышение качества продуктов
питания, а также повышение производительности труда на её пред-
приятиях за пятилетие на 30-33%.

Автоматизация производственных процессов тесно связана с повы-
шением производительности труда и улучшением качества продуктов
питания. Поэтому она приобретает всё большее значение в развитии
пищевой промышленности.

В развитии автоматизации производственных процессов можно вы-
делить несколько направлений. Первое из них связано с распростра-
нением автоматизации на новые, еще не охваченные автоматизацией
процессы. Второе - с усовершенствованием или более рациональным
использованием уже существующей автоматики. Третье - с разработ-
кой новых, более совершенных систем управления, позволяющих полу-
чать лучшее качество регулирования по сравнению с действующими
системами. Последнее направление связано также с перспективной
распространения автоматизации на процессы, где использование су-
ществующей автоматики не обеспечивает требуемого качества регу-
лирования.

Данная работа связана с третьим направлением развития автома-
тизации, причем в ней рассматриваются вопросы анализа и синтеза
специального класса оптимальных систем управления.

Оптимальным системам управления (ОСУ) в литературе уделяется

большое внимание. За последние 20 лет в указанном разделе теории управления, получены фундаментальные теоретические результаты, часто позволяющие получать конкретные решения. Из встречающихся результатов следует выделить работы, посвященные оптимальным по быстродействию системам и минимизирующим интеграл от квадратичной формы. Что касается исследований других ОСУ, то им уделено значительно меньше внимания. Между тем в литературе встречаются исследования оптимальных по компромиссному критерию систем управления. В указанных системах при их проектировании имеется возможность отразить два показателя качества регулирования - времени переходного процесса и затрат "топлива" на управление. Они привлекают внимание также наличием ряда свойств соответствующего оптимального управления, к которым следует отнести релейность оптимального управления и его трёхпозиционность с наличием интервала с нулевым значением управляющего воздействия.

Релейность указывает на то, что оптимальным системам компромиссного управления (ОСКУ) будут хотя бы частично присущи известные из практики свойства позиционных регуляторов - их простота и надёжность. Кроме этого отмеченная нелинейность ОСКУ имеет непосредственное отношение к повышению точности систем в условиях действующих на них возмущений, так как нелинейные системы в ряде случаев (что известно из литературы) обладают улучшенными свойствами в неавтономном режиме. Это имеет существенное значение при автоматизации объектов пищевой промышленности, поскольку последние чаще всего находятся в условиях значительных возмущений.

Трёхпозиционность должна приблизить ОСКУ по точности автономного режима к линейным АСР, широко распространенных на практике и обладающих высокой точностью автономного режима. Повышение точности особенно важно при управлении объектами с запаздыванием, так как последние являются распространенными в пищевой промышленности.

Возможность учёта в компромиссном критерии (К-критерии) времени переходного процесса и затрат "топлива" на управление (что само по себе важно и представляет интерес) даёт основание получать более общие результаты по сравнению с отдельно взятым критерием оптимального быстродействия или затрат "топлива" на управление. Кроме этого К-критерий допускает интересное обобщение, позволяющее приблизиться к проблеме выбора критерия оптимальности по заданным характеристикам управляемого процесса в случае, когда управляющее воздействие по принципу реализации является многоступенчатым.

Таким образом, указанные свойства оптимального по К-критерию управления связаны с широким кругом вопросов, имеющих значение для практики. Поэтому в работе, основываясь на указанном критерии оптимальности, поставлены следующие задачи:

1. Исследовать особенности ОСКУ применительно к объектам пищевой промышленности с целью выявления свойств, имеющих значение для практики, в частности:

- а) выявить класс функций, к которому принадлежит управление, минимизирующее обобщенный К-критерий оптимальности;
- б) рассмотреть задачу синтеза систем управления объектами с запаздыванием и без него и решить её для типовых объектов пищевой промышленности;
- в) исследовать переходные и установившиеся режимы в ОСКУ;
- г) исследовать влияние случайных и гармонических возмущений на ОСКУ;

2. Разработать и обосновать методики анализа и синтеза рассматриваемых систем, в том числе:

- а) отработать методику синтеза ОСКУ на примере распространённого в пищевой промышленности объекта;
- б) применить наиболее распространённые методы исследования АСУ и выявить особенности их применения в рассматриваемом случае;

в) разработать методики синтеза квазиоптимальных систем ком-
промиссного управления.

3. Выяснить вопросы практической реализуемости выявленных
свойств ОСКУ:

а) моделированием ОСКУ на аналоговых вычислительных машинах на
примерах объектов пищевой промышленности;

б) проверкой основных свойств на экспериментальной установке с
использованием физической модели объекта и выпускаемой промышлен-
ностью аппаратуры.

4. Сравнить получаемые законы управления с распространенными в
пищевой промышленности линейными и позиционными законами на аксо-
периментальной установке.

Научная новизна работы состоит в обобщении К-критерия и дока-
зательства релейности, многоступенчатости и наличия конечного
числа точек разрыва соответствующего оптимального управления; в
решении задачи синтеза ОСКУ для ряда объектов; в разработке мето-
да синтеза прогнозирующих устройств для управления объектами с
запаздыванием и подходе к их упрощению; во всестороннем исследо-
вании указанного класса ОСУ с проверкой обнаруженных свойств ОСУ
на аналоговых моделях, ЦВМ и на экспериментальной установке с ис-
пользованием выпускаемой промышленностью аппаратуры.

Практическая ценность работы заключается в разработке схем
регуляторов, позволяющих получать повышенную точность регулирова-
ния в том числе в случае, когда по принципу реализации управление
является многоступенчатым; в разработке методик исследования со-
ответствующих систем в различных условиях; в составлении таблиц,
пригодных для их использования при решении задачи синтеза ОСУ и
прогнозирующих устройств; в разработке схемы регулятора, реализуе-
мого на выпускаемых промышленностью элементах автоматики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и
предложений, описки использованной литературы и приложений, изло-

женных на 69 стр.

С о д е р ж а н и е р а б о т ы

Физический смысл К-критерия, его обобщение и состояние теории ОСКУ

При проектировании ОСУ каким-либо объектом существенным явля-
ется выбор критерия оптимальности. Одним из важных показателей,
характеризующих системы управления, является стоимость затрат на
производство единицы готовой продукции управляемого процесса. По-
этому указанную стоимость желательно отразить в выбираемом функ-
ционале.

Материальные затраты производства можно разделить на две час-
ти, одна из которых в большей или меньшей мере зависит от функци-
онирования системы управления, а другая (например, стоимость сы-
рья) — полностью независимой. В выбираемом функционале разумно
отрезать лишь первую часть указанных затрат, к которым следует
отнести амортизационные отчисления на оборудование и аппаратуру,
зарплату обслуживающего персонала и затраты, связанные с расходом
топлива и электроэнергии. Другую часть при проектировании ОСУ
можно не учитывать.

Амортизационные отчисления и зарплату обслуживающего персонала
можно считать пропорциональными времени, затрачиваемого на произ-
водство продукта. Что касается расходов топлива и электроэнергии,
то их стоимость пропорциональна количеству общей израсходованной
энергии. Поэтому указанные затраты на производство единицы гото-
вой продукции можно представить в виде

$$S = \alpha \cdot T + \beta \theta, \quad (I)$$

где S — общая стоимость затрат; T — время, которое необхо-
димо на производство готового продукта; θ — общее количество

израсходованного топлива и электроэнергии, выраженное в общих единицах; α — амортизационные отчисления и зарплата обслуживающего персонала в единицу времени; β — стоимость единицы энергии. Если речь идёт об автоматизации какого-либо процесса, то желательным является выбор такой системы управления, которая минимизировала бы величину S .

В работах Ануфриева А.А. и Шишацкого Ю.И. и др. уже рассматривался критерий, аналогичный (I), применительно к сушильным установкам.

В данной работе показано, что во многих случаях минимизация (I) равносильна минимизации функционала

$$J = \int_0^T (1 + \gamma |u|) dt, \quad (2)$$

где u — выбранное управляющее воздействие, которое считается ограниченным; γ — неотрицательное число.

Критерий минимума функционала (2) в работе О.И. Ларичева впервые назван компромиссным. Это название отражает возможность за счёт изменения коэффициента γ в (2) в большей или меньшей мере учитывать время T в функционале. В частном случае при $\gamma=0$ К-критерий вырождается в критерий оптимального быстродействия, а при $\gamma \rightarrow \infty$ основной вклад в значение (2) вносит второе слагаемое, что соответствует требованию минимизации затрат энергии.

Независимо от связи со стоимостью К-критерий учитывает время переходного процесса в системе управления и "штрафует" большие отклонения управления от его нулевого значения. Этим самым в одном критерии отражаются вопросы экономического содержания и важные показатели процессов управления.

Применение на практике критерия по сути являющегося компромиссным встречается в работах М.Л. Мандельштейна и В.Р. Сатановского,

связанных с автоматизацией брагоректификационных аппаратов. Следует отметить, что внедрение соответствующей системы позволило получить значительный экономический эффект.

Таким образом, оптимизация функционала (2) связана со стоимостью затрат, имеет непосредственное отношение к важным показателям процессов управления и практическое значение, а поэтому изучение свойств и особенностей соответствующих ОСУ представляет большой интерес.

Первые результаты, относящиеся к оптимальным по (2) системам, получены в 1962-63 гг. в работах М.Атанаса, И.Флигге-Лотц, П.Фалба и др., где рассматривались в основном вопросы управляемости при фиксированном времени переходного процесса. Методика решения задачи синтеза соответствующей ОСУ при незаданном значении времени переходного процесса изложена в статье В.А.Петрова и Г.В.Скворцова на одном примере.

Трёхпозиционность оптимального по (2) управления для линейных объектов произвольного порядка доказана в работе О.И. Ларичева, где выясняется также количество его точек переключения. Различные модификации этого критерия с точки зрения его физического смысла рассмотрены в монографии М.Атанаса и П.Фалба, где приведено также решение задачи синтеза для двух объектов и глубоко исследованы особенности её решения.

Некоторые обобщения функционала (2) и общие вопросы теории имеют в работах Н.В.Куланова и Д.Смитгала. Вопросы управляемости и устойчивости систем управления с ограниченными ресурсами рассматриваются в монографии А.М.Формальского.

Однако исследований динамики этих систем и установившихся режимов при управлении объектами с запаздыванием в литературе не встречается. Нет также исследований влияния периодических и случайных возмущений на их динамику. Отсутствует решение задачи

синтеза оптимальных по компромиссному критерию систем управления объектами с запаздыванием и связанных с ней вопросов.

Нерешенные задачи связаны в первую очередь с вопросами точности и работоспособности ОСКУ в различных условиях, имеющих существенное значение при управлении объектами пищевой промышленности, так как последние чаще всего имеют запаздывание и подвержены возмущениям.

В силу указанных причин настоящая работа посвящена вопросам анализа и синтеза ОСКУ применительно к объектам пищевой промышленности с целью выявления имеющих значение для практики свойств.

Кроме этого в работе получено обобщение критерия (2), вызванное желанием в критерии оптимальности отразить существующую на практике асимметрию зависимости экономического показателя качества системы управления от управляющего воздействия, известную, например, по работам М.Л.Мандельштейна.

Обобщенный К-критерий имеет вид

$$J = \int_0^T (1 + \sum_{i=1}^m \gamma_i |u - d_i|) dt, \quad (3)$$

где $\gamma_1; \gamma_2; \dots; \gamma_m$ — заданные постоянные числа; d_1, d_2, \dots, d_m — известные значения управляющего воздействия; m — число промежуточных значений управления. Возможность учета в критерии оптимальности заранее известных значений управления может иметь значение в тех случаях, когда по принципу реализации управление является многоступенчатым. Эта особенность привлекает внимание, так как многоступенчатое управление с заданными его значениями весьма часто встречается в практике. Например, из работ И.И.Кринецкого, И.С.Миронова, В.В.Морозова известно, что автоматическое поддержание экономического вакуума в конденсационных паротурбинных установках с индивидуальными насосами допускает ступенчатое

регулирование расхода охлаждающей воды; автоматическое регулирование температуры кипения в испарительной системе холодильной установки осуществляется с помощью ступенчатых систем, что известно по работам Я.М.Зильберберга; многоступенчатое регулирование встречается при использовании параллельно работающих тепловых агрегатов, чему посвящены некоторые работы Б.И.Таубмана и др.

Отметим, что при $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_m = 0$ критерий (3) совпадает с критерием оптимального быстрогодействия, а при $m=1$; $d_1=0$ — с критерием (2). Это означает, что результаты, полученные для систем, оптимальных по (3), должны быть пригодны для систем, оптимальных по быстродействию и по критерию (2). Поэтому в данной работе кроме результатов, относящихся к функционалу (2), имеются решения вопросов, связанных с критерием (3).

Синтез ОСКУ и исследование влияния запаздывания в объекте на установивший режим

Объекты пищевой промышленности, исследование которых проводилось во Всесоюзном научно-производственном объединении "Пищепромавтоматика", в большинстве случаев с достаточной для практических расчетов точностью могут быть описаны дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, как правило, низкого порядка. Поэтому в данной работе задача синтеза ОСКУ рассматривается для объектов, возмущенное движение которых описывается системой уравнений

$$\dot{x}^i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x^j + b_i u + g_i; \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

где x^1, x^2, \dots, x^n — фазовые координаты объекта; a_{ij}, b_i — известные постоянные, причем $b_1 = b_2 = \dots = b_{n-1} = 0$; $b_n = b \neq 0$; u — управление, удовлетворяющее ограничению

$$|u| \leq 1. \quad (5)$$

Кроме этого для определенности считается, что в (3) промежуточные значения d_i удовлетворяют условию $-1 < d_1 < d_2 < \dots < d_m < 1$.

Для решения указанной задачи требуется найти управление u как функцию фазовых координат, которое переводит объект (4) из произвольного положения в начало координат фазового пространства и при этом функционал (3) достигает наименьшего значения.

Искомое управление, как показано в работе, обладает рядом свойств, о которых говорится в следующих теоремах.

Т е о р е м а 1. Неособое оптимальное управление задачи (3)-(4)-(5) кусочно-постоянно и принимает лишь значения

$$-1; d_1; d_2; \dots; d_m; 1.$$

В доказательстве использован принцип максимума.

Т е о р е м а 2. Неособое оптимальное управление задачи (3)-(4)-(5) не может иметь точек разрыва больше, чем $(m+1)n-1$, если корни характеристического уравнения системы (4) вещественны.

Если среди указанных корней имеются нулевые, то число этих точек не превышает $(m+1)(n-1)$.

Т е о р е м а 3. Необходимым и достаточным условием оптимальности неособого управления $u(t)$ задачи (3)-(4)-(5) с действительными корнями характеристического уравнения системы (4) является существование функции нескольких переменных, достигающей условного минимума в некоторой точке.

Способ нахождения аналитического задания упомянутой в формулировке теоремы функции и названных условий указан в доказательстве последней теоремы.

Доказанные теоремы дают основание утверждать, что К-критерий (3) можно применять в тех случаях, когда по принципу реализации управления является многоступенчатым. Кроме этого они позволяют свести задачу оптимального управления к исследованию на условный

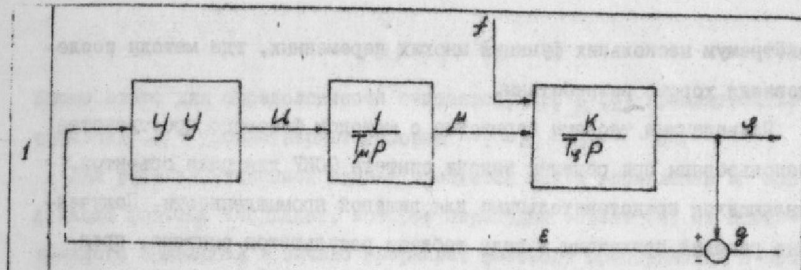
экстремум нескольких функций многих переменных, где методы исследования хорошо разработаны.

Приведенные теоремы совместно с методом фазового пространства использованы при решении задачи синтеза ОСКУ для ряда объектов, являющихся представительными для пищевой промышленности. Полученные решения приведены в виде таблицы результатов синтеза, представление о которой можно получить по таблице I, автореферата, где дано окончательное решение одной из задач. Все переменные в формулах даны в безразмерной форме и указаны формулы перехода от размерных к безразмерным величинам, что даёт возможность применять готовое решение в конкретных примерах.

Изложена методика решения задачи синтеза ОСКУ на примере объекта, состоящего из интегрирующего и апериодического звеньев. Синтезированное компромиссное управление использовано для выяснения структуры управляющего устройства, реализующего это управление. Одна из возможных схем оптимального управляющего устройства имеется в работе.

Для объектов с запаздыванием методом точечного преобразования с использованием ЭЦМ проведено исследование ОСКУ, показавшее, что в них более точно отрабатывается задающее воздействие, чем в оптимальных по быстродействию системах. Их положительным свойством является также то, что изменением весового коэффициента γ в (2) можно воздействовать на установившийся режим ОСУ, причем скорость вхождения в их автоколебания повышается с ростом γ . Имеется также исследование влияния числа промежуточных уровней управления на установившийся режим ОСКУ, которое показывает повышение точности системы с ростом числа этих уровней.

Определена чувствительность ОСКУ к изменению ряда её параметров, где выявлено понижение чувствительности к их изменению с ростом γ . Огрубление ОСУ, тенденция к которому обнаружена в



1	Уравнения возмущенного движения объекта в размерных величинах	$T_γ \dot{y} = K(m + f); T_μ \dot{m} = u;$ $\varepsilon = y - g$
2	Уравнения возмущенного движения объекта в безразмерных величинах	$\ddot{x} = u;$
3	Формулы связи размерных и безразмерных величин	$x = \frac{T_μ}{K T_γ} \varepsilon; t_0 = \frac{t}{T_γ};$
4	Типы допустимых задающего и возмущающего воздействий	$g = v_0 + v_1 t;$ $f = a_0$
5	Минимизируемый функционал	$J = \int_0^1 (1 + \gamma_1 u + \alpha 1 + \gamma_2 u + \gamma_3 u - \alpha) dt$
6	Оптимальное управление	$u(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } p \in H_1; \\ -1, & \text{если } p \in H_2 \cup H_3; \\ 0, & \text{если } p \in H_4 \cup H_5; \\ -\alpha, & \text{если } p \in H_6 \cup H_7; \\ \alpha, & \text{если } p \in H_8. \end{cases}$
7	Функции переключения	$F_1 \equiv x + 0,5 K_1 y^2 = 0;$ $F_2 \equiv x + 0,5 K_2 y^2 = 0;$ $F_3 \equiv x + 0,5 K_3 y^2 = 0;$ $F_4 \equiv x + 0,5 y^2 = 0;$ $F_5 \equiv x - 0,5 K_4 y^2 = 0;$ $F_6 \equiv x - 0,5 K_5 y^2 = 0;$ $F_7 \equiv x - 0,5 K_6 y^2 = 0;$ $F_8 \equiv x - 0,5 y^2 = 0.$

Таблица 1

Значения коэффициентов K_i				
$K_1 = \frac{4\delta_2(1+\delta_3 d)}{(1+\delta_1 d - \delta_3 d)^2} + \frac{(1+\delta_1 d + \delta_3 d)^2}{(1+\delta_1 d - \delta_3 d)} \cdot K_2;$		$K_2 = \frac{4\delta_2}{1+\delta_1 d + \delta_3 d} + K_3;$		
$K_3 = \frac{4\delta_1(1+\delta_3 d)}{(1+\delta_1 d - \delta_3 d)^2} + \frac{(1+\delta_3 d - \delta_1 d)^2}{(1+\delta_1 d + \delta_3 d)};$		$K_4 = \frac{4\delta_1(1+\delta_3 d)}{(1+\delta_1 d - \delta_3 d)^2} + \frac{(1+\delta_1 d + \delta_3 d)^2}{(1+\delta_3 d - \delta_1 d)} K_5;$		
$K_5 = \frac{4\delta_2}{1+\delta_1 d + \delta_3 d} + K_6;$		$K_6 = \frac{4\delta_2(1+\delta_1 d)}{(1+\delta_1 d + \delta_3 d)^2} + \frac{(1+\delta_1 d - \delta_3 d)^2}{(1+\delta_1 d + \delta_3 d)};$		
9		10		
Аналитическое задание областей H_i		Вид областей H_i на фазовой плоскости		
Случай I $(\delta_3 - \delta_1) \alpha < -1$				
$H_1 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_2 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_3 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \leq 0 \end{cases}$	$H_4 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \\ F_4 \leq 0 \end{cases}$	
$H_5 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_6 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \leq 0 \\ F_2 \geq 0 \end{cases}$	$H_7 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_2 \leq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_8 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_3 \leq 0 \\ F_4 \geq 0 \end{cases}$	
Случай II $(\delta_3 - \delta_1) \alpha = -1$				
$H_1 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_2 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_3 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \leq 0 \end{cases}$	$H_4 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \\ F_4 \leq 0 \end{cases}$	
$H_5 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_6 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \leq 0 \\ F_2 \geq 0 \end{cases}$	$H_7 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_2 \leq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_8 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_3 \leq 0 \\ F_4 \geq 0 \end{cases}$	
Случай III $1 > (\delta_3 - \delta_1) \alpha > -1$				
$H_1 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_2 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_3 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \leq 0 \end{cases}$	$H_4 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \\ F_4 \leq 0 \end{cases}$	
$H_5 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_6 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \leq 0 \\ F_2 \geq 0 \end{cases}$	$H_7 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_2 \leq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_8 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_3 \leq 0 \\ F_4 \geq 0 \end{cases}$	
Случай IV $(\delta_3 - \delta_1) \alpha = 1$				
$H_1 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_2 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_3 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \leq 0 \end{cases}$	$H_4 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \\ F_4 \leq 0 \end{cases}$	
$H_5 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_6 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \leq 0 \\ F_2 \geq 0 \end{cases}$	$H_7 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_2 \leq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_8 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_3 \leq 0 \\ F_4 \geq 0 \end{cases}$	
Случай V $(\delta_3 - \delta_1) \alpha > 1$				
$H_1 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_2 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_3 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_2 \geq 0 \\ F_3 \leq 0 \end{cases}$	$H_4 \begin{cases} y \geq 0 \\ F_3 \geq 0 \\ F_4 \leq 0 \end{cases}$	
$H_5 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \geq 0 \\ F_2 \leq 0 \end{cases}$	$H_6 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_1 \leq 0 \\ F_2 \geq 0 \end{cases}$	$H_7 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_2 \leq 0 \\ F_3 \geq 0 \end{cases}$	$H_8 \begin{cases} y \leq 0 \\ F_3 \leq 0 \\ F_4 \geq 0 \end{cases}$	

исследованиях, имеет положительное значение для практики.

Для выяснения вопросов реализуемости компромиссного управления, правильности представлений о его свойствах и проверки выявленного повышения точности ОСКУ проведено моделирование полученных систем на АЭМ МЭТ-9. Моделирование подтвердило правильность полученных теоретически представлений о компромиссном управлении, выводы о повышении точности и показало реализуемость полученных законов управления.

Несмотря на повышение точности ОСКУ с ростом γ амплитуда их автоколебаний увеличивается при возрастании запаздывания в объекте управления. Поэтому возникает необходимость решения задачи синтеза ОСКУ объектами с запаздыванием.

Синтез ОСКУ объектами с запаздыванием
и исследование автономного режима

Для решения задачи синтеза оптимальных по быстродействию систем управления объектами с запаздыванием А.А.Павловым, А.В.Репниковым и др. применялся метод компенсации запаздывания, позволяющий в несколько раз уменьшить амплитуду автоколебаний в этих системах. Однако в системах компенсированного запаздывания изображающая точка входит в предельный цикл не лучшим образом, который к тому же имеет случайный характер. В связи с этим указанными авторами рассматривались оптимальные по быстродействию системы "учтённого" временного запаздывания, в которых предельный цикл выбирался наименьшим из возможных, причем изображающая точка попадала в него за минимальное число переключений.

Применение этих методов для синтеза ОСКУ объектами с запаздыванием показало, что в полученных системах теряется ряд положительных свойств ОСКУ несмотря на то, что уменьшения амплитуды автоколебаний удаётся достигнуть. Поэтому для целей синтеза ис-

Таблица 2.

№ п/п	Уравнение объекта	Формулы для прогнозируемых координат
1	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = u(t-\tau) + G_0.$	$x^n = x_n^n + x_u^n; \quad y^n = y_n^n + y_u^n;$ $x_n^n = x + \tau y; \quad y_n^n = y;$ $\dot{x}_u^n = y_u^n - \tau u(t-\tau) - \tau G_0;$ $\dot{y}_u^n = u(t) - u(t-\tau).$
2	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = -y + u(t-\tau) + G_0.$	$x^n = x_n^n + x_u^n; \quad y^n = y_n^n + y_u^n;$ $x_n^n = x + (1 - e^{-\tau})y; \quad y_n^n = ye^{-\tau};$ $\dot{x}_u^n = y_u^n - (1 - e^{-\tau})u(t-\tau) - (1 - e^{-\tau})G_0;$ $\dot{y}_u^n = -y_u^n + u(t) - e^{-\tau}u(t-\tau) + (1 - e^{-\tau})G_0.$
3	$\dot{x} = y - x;$ $\dot{y} = -\nu y + u(t-\tau) + G_0.$	$x^n = x_n^n + x_u^n; \quad y^n = y_n^n + y_u^n;$ $x_n^n = x e^{-\tau} + y \frac{1-\nu}{1-\nu} (e^{-\nu\tau} - e^{-\tau}); \quad y_n^n = y e^{-\nu\tau};$ $\dot{x}_u^n = y_u^n - x_u^n - \frac{1-\nu}{1-\nu} (e^{-\nu\tau} - e^{-\tau})(u(t-\tau) + G_0);$ $\dot{y}_u^n = -\nu y_u^n + u(t) + G_0 - e^{-\nu\tau}(u(t-\tau) + G_0).$
4	$\dot{x} = y - x;$ $\dot{y} = -y + u(t-\tau) + G_0.$	$x^n = x_n^n + x_u^n; \quad y^n = y_n^n + y_u^n;$ $x_n^n = x e^{-\tau} + y \tau e^{-\tau}; \quad y_n^n = y e^{-\tau};$ $\dot{x}_u^n = y_u^n - x_u^n - \tau e^{-\tau}(u(t-\tau) + G_0);$ $\dot{y}_u^n = -y_u^n + u(t) + G_0 - e^{-\tau}(u(t-\tau) + G_0).$
5	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = -2\zeta y - x + u(t-\tau).$	$x^n = x_n^n + x_u^n; \quad y^n = y_n^n + y_u^n;$ $x_n^n = x e^{-\zeta\tau} (\cos \omega\tau + \frac{\zeta}{\omega} \sin \omega\tau) + y e^{-\zeta\tau} \frac{1}{\omega} \sin \omega\tau;$ $y_n^n = x e^{-\zeta\tau} \frac{1}{\omega} \sin \omega\tau + y e^{-\zeta\tau} (\cos \omega\tau - \frac{\zeta}{\omega} \sin \omega\tau);$ $\dot{x}_u^n = y_u^n - e^{-\zeta\tau} \frac{1}{\omega} \sin \omega\tau \cdot u(t-\tau);$ $\dot{y}_u^n = -2\zeta y_u^n - x_u^n + u(t) - e^{-\zeta\tau} (\cos \omega\tau - \frac{\zeta}{\omega} \sin \omega\tau) \cdot u(t-\tau).$ <p style="text-align: center;">$\omega = \sqrt{1 - \zeta^2}$.</p>

Таблица 3

$0,5\tau \dot{z} + z = K_{11} u(t) + K_{12}$		
№	Уравнение объекта	Значения коэффициентов K_{ij}
1	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = u(t-\tau) + G_0;$	$K_{12} = 0,5G_0\tau^2; K_{22} = G_0\tau;$ $K_{11} = 0,5\tau^2; K_{21} = \tau.$
2	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = -y - u(t-\tau) + G_0.$	$K_{12} = (\tau - 1 + e^{-\tau})G_0; K_{22} = (1 - e^{-\tau})G_0;$ $K_{11} = \tau - 1 + e^{-\tau}; K_{21} = 1 - e^{-\tau}.$
3	$\dot{x} = y - x;$ $\dot{y} = -\nu y + u(t-\tau) + G_0;$	$K_{12} = K_{11} \cdot G_0; K_{22} = K_{21} \cdot G_0;$ $K_{11} = \frac{1}{1-\nu} e^{-\tau} + \frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu(1-\nu)} e^{-\nu\tau};$ $K_{21} = \frac{1}{\nu} (1 - e^{-\nu\tau});$
4	$\dot{x} = y - x;$ $\dot{y} = -y + u(t-\tau) + G_0;$	$K_{12} = K_{11} \cdot G_0; K_{22} = K_{21} \cdot G_0;$ $K_{11} = 1 - e^{-\tau} - \tau e^{-\tau};$ $K_{21} = 1 - e^{-\tau};$
5	$\dot{x} = y;$ $\dot{y} = -2\zeta y - x + u(t-\tau).$	$K_{12} = 0; K_{22} = 0;$ $K_{11} = 1 - e^{-\zeta\tau} (\cos\omega\tau + \frac{\zeta}{\omega} \sin\omega\tau),$ $K_{21} = -\frac{1}{\omega} e^{-\zeta\tau} \sin\omega\tau;$ $\omega = \sqrt{1 - \zeta^2}.$

пользован метод прогнозирования фазовых координат, который рассматривался О.Г. Варшавским, А.Я. Лернером и др. при решении подобных задач для управления объектами второго порядка.

Метод прогнозирования фазовых координат предполагает обнаружение преобразования выходных координат объекта, позволяющего с некоторым упреждением формировать команду на соответствующее изменение управления. Однако он не указывает правила получения этого преобразования. Впервые рассмотренный в работе способ получения прогнозируемых фазовых координат даёт это правило для линейных объектов произвольного порядка. Поэтому он является новым методом синтеза прогнозирующих устройств для управления объектами с запаздыванием, пригодным также для оптимальных по быстродействию АСУ. Применение этого метода позволило выявить структуру прогнозирующих устройств, идеальная реализация которых позволяет полностью исключить запаздывание в детерминированных объектах за исключением незначительной части фазового пространства.

Выявлены свойства прогнозируемых от управления фазовых координат, позволившие предложить способ упрощения прогнозирующих устройств, направленный на реализуемость блоков прогноза. Некоторые результаты применения этих методов для аналитического решения задачи синтеза прогнозирующих устройств приведены в таблицах 2, 3. Таблицу 3 можно использовать для вычисления коэффициентов прогнозирования в случае, когда прогнозируемые от управления координаты $x_u^n; y_u^n$ вычисляются упрощенно по формулам

$$x_u^n = K_{11} \cdot Z; \quad y_u^n = K_{21} \cdot Z.$$

В связи с тем, что применение метода точечных преобразований для исследования систем связан с необходимостью решения уравнений движения объекта, а также из-за возникающих принципиальных трудностей его применения для исследования ОСКУ с блоками прогноза, в

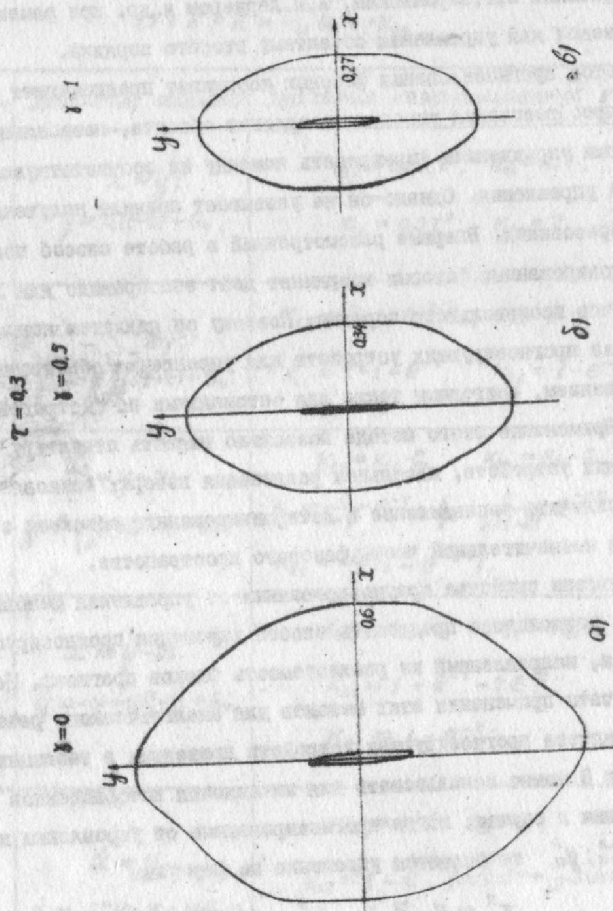


Рис. 1

работе для исследования ОСКУ используется метод гармонической линеаризации. Приведена специфика применения этого метода для рассматриваемого класса систем управления. Имеется оценка точности метода гармонической линеаризации в случае, когда оптимальные законы используются для управления объектами с запаздыванием без прогнозирующих блоков. Погрешность вычисления амплитуды и частоты автоколебаний этим методом при $\frac{\tau}{T} > 0,05$ не превосходит 10%, что является приемлемым для практических расчетов.

Для определения параметров автоколебаний в ОСКУ с блоками прогноза дана методика применения гармонической линеаризации и получены некоторые результаты, показывающие высокую эффективность использования упрощенных устройств прогнозирования, что свидетельствует о правильном подходе к их синтезу.

Гармоническая линеаризация использована также при вычислении чувствительности амплитуды и частоты автоколебаний к изменению запаздывания в объекте.

Вопросы реализуемости упрощенных устройств прогнозирования, их эффективности и точности ОСКУ с блоками прогноза проверены и выполнены моделированием этих систем на АВМ МПТ-9. Моделирование подтвердило высокую эффективность блоков прогноза, их реализуемость и высокую точность полученных систем управления. Представление об этом можно получить по рис.1, где приведены предельные циклы одной из моделируемых систем, при различных значениях коэффициента γ функционала (2). Внешние циклы получены без использования прогнозирующих блоков, а внутренние - при их наличии.

Исследование ОСКУ в условиях гармонических, случайных и параметрических возмущений

В соответствии с поставленными задачами исследования и в связи с повышенной точностью ОСКУ в автономном режиме рассмотрено

влияние различных возмущений на установившийся режим ОСКУ. Полученные законы компромиссного управления использовались для управления объектом, динамика которого существенно зависит от знака управляющего воздействия. Указанная несимметрия при использовании компромиссного управления приводит, как показано в работе, к появлению смещения предельного цикла и, следовательно, к появлению ненулевого среднего значения отклонения регулируемой величины от требуемого значения. Однако с увеличением весового коэффициента γ функционала (2) это смещение уменьшается, что имеет положительное значение для практики.

Для исследования компромиссных законов управления применительно к объектам с несимметрией в условиях гармонических возмущений, действующих на объект, использован метод приспособивания совместно с вычислением на ЭЦМ необходимых характеристик процессов. Составлена программа расчёта на ЭЦМ переходных процессов указанных систем управления при наличии запаздывания в объекте и действующих на него гармонических возмущений, с помощью которой проведено исследование ОСКУ. Анализ полученных результатов показывает, что в условиях гармонических возмущений ОСКУ являются более точными по сравнению с оптимальными по быстродействию АСУ. Это означает, что при использовании ОСКУ в сложной системе управления, где имеются другие автоколебательные подсистемы, действие которых через управляемый объект сказывается на ОСКУ, более рационально использовать исследуемые компромиссные управляющие устройства.

Из литературы известно, что при наличии гармонических возмущений в системе может возникать явление захватывания. Поэтому в работе исследовано явление захватывания в системе управления с компромиссным законом управления и наличием прогнозирующих блоков, а также без них. Изложена методика применения гармонической линеаризации для этих целей: если в системе имеется объект произвольно-

го порядка. Анализ полученных результатов исследования показывает, что область захватывания в ОСКУ смещается в сторону высоких задающих частот с ростом весового коэффициента γ функционала (2). Особенно значительным это смещение является для ОСКУ с блоками прогноза. Поэтому ОСКУ целесообразнее использовать в тех случаях, когда возмущения являются низкочастотными. Преимуществом исследуемых ОСУ является также возможность их подстройки за счёт изменения параметра γ на соответствующую частоту.

Кроме параметрических и гармонических возмущений объекты пищевой промышленности подвержены также влиянию случайных возмущающих воздействий. Поэтому в работе рассмотрены вопросы точности ОСКУ в условиях случайных возмущений. Для исследования ОСКУ в указанных условиях использован метод статистической линеаризации, выявлены особенности его применения и получены расчётные формулы. Здесь же предложены упрощения для исследования ОСКУ с прогнозирующими устройствами. Для вычисления дисперсии отклонения выходной величины объекта использовались ЭЦМ. Расчёт проводился по программе, составленной на основании полученных формул. Анализ результатов расчёта подтверждает обнаруженное ранее в других условиях повышение точности ОСКУ при увеличении параметра γ .

Таким образом, и в условиях различных возмущений имеет место повышение точности исследуемых систем с ростом весового коэффициента γ в (2).

Наиболее важно это свойство с точки зрения возможных применений ОСКУ к объектам пищевой промышленности в условиях случайных возмущений. Поэтому правильность полученного вывода и работоспособность ОСКУ в этих условиях проверена их моделированием на АММ МПТ-9. Моделирование подтвердило выявленное теоретически повышение точности. Особо возрастала точность при использовании блоков прогноза.

Синтез квазиоптимальных систем,
моделирование и экспериментальная
проверка основных результатов

Функции переключения, от которых зависит полученное компромиссное управление, являются нелинейными. Реализация нелинейностей на практике связана с определенными трудностями. Ввиду наличия имеющих значение для практики выявленных положительных свойств ОСКУ и существующих трудностей реализации нелинейных законов рассмотрена задача синтеза квазиоптимальных систем управления. Для ее решения использованы три метода, основанные на замене функций переключения линейными выражениями относительно фазовых координат. Один из методов базируется на замене линий переключения прямыми так, чтобы оптимальность управления при этом не нарушалась. Недостатком этого метода является зависимость угловых коэффициентов получаемых линий от начальных условий. Поэтому его целесообразно применять в тех случаях, когда процесс периодически повторяется, исходя из сравнительно узкой области начальных условий. Для указанных целей применялся также метод наименьших квадратов и замена нелинейностей полиномами Чебышева. Для их сравнения полученные квазиоптимальные системы управления моделировались на АЧМ МПТ-9. Моделирование показало, что сравниваемые системы отличаются несущественно. Это означает, что последние методы одинаково пригодны для целей синтеза квазиоптимальных АСУ. Приведена также методика применения рассмотренных методов и некоторые результаты решения.

Кроме указанного упрощения рассмотрены некоторые возможности получения регуляторов, реализующих компромиссное управление, без измерения производной. Предлагаемые упрощения и соответствующие формулы расчета касаются ОСКУ с прогнозирующими устройствами и без них. Это имеет значение при разработке управляющих устройств в том числе для управления объектами с запаздыванием. В работе

приведены несколько схем регуляторов, в которых реализуются полученные соотношения.

Для более полного представления о возможностях ОСКУ приведено их сравнение с распространенными в пищевой промышленности позиционными и линейными системами. Теоретическое сравнение соответствующих законов управления применительно к объекту, состоящему из двух апериодических звеньев, имеющему запаздывание и подверженному воздействию случайных возмущений, показало, что исследуемые квазиоптимальные системы управления с прогнозирующими устройствами дают возможность получить в большинстве случаев дисперсию выходной величины объекта в два-три раза меньше, чем при использовании линейных законов регулирования. Различные настройки ПИ и ПИД законов регулирования соответствовали аperiodическому переходному процессу, с 20-ти процентным перерегулированием и настройке на минимум интеграла от квадрата ошибки.

С целью сравнения приведены результаты моделирования девяти объектов пищевой промышленности, для управления которыми использовались различные законы управления. Анализ результатов показывает, что время переходного процесса в линейных АСУ в среднем в два раза больше, чем в исследуемой. Кроме этого динамический коэффициент регулирования в линейных АСУ получился в среднем на 40% больше, чем в системах с квазиоптимальными законами управления.

В соответствии с поставленными задачами приведено сравнение компромиссных законов управления в распространенными в пищевой промышленности линейными и позиционными законами на экспериментальной установке с использованием физической модели объекта и выпускаемой промышленностью аппаратуры автоматики. В качестве физической модели управляемого объекта, представляющего собой модель широко распространенных в пищевой промышленности тепловых процессов, взята электронагревательная печь. На экспериментальной

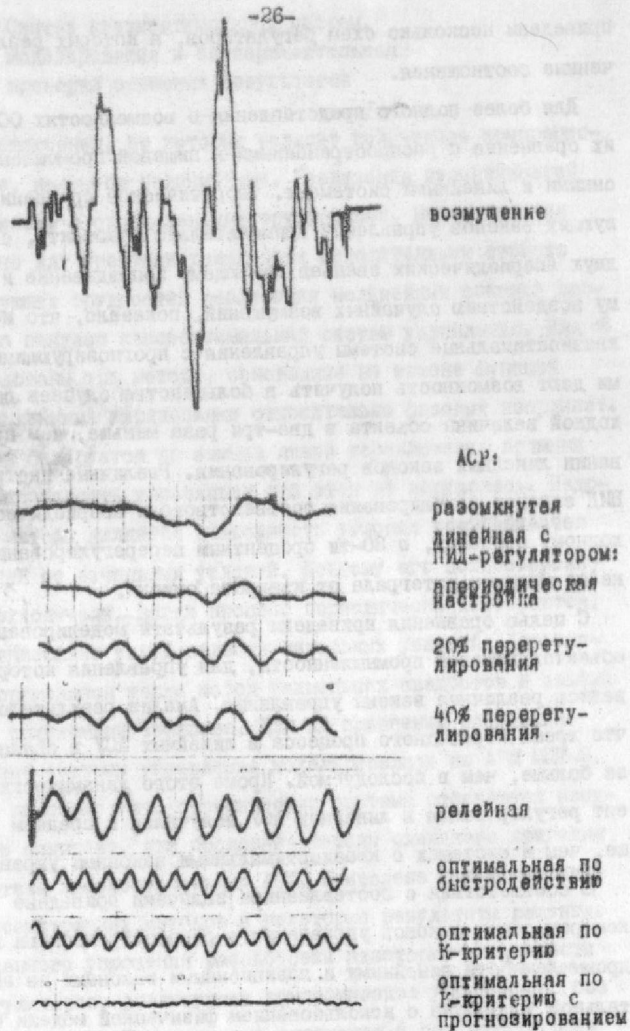


Рис. 2

установка предусмотрена возможность реализации различных законов управления: всех линейных законов, позиционного, оптимального по быстродействию, компромиссного и компромиссного с блоками прогноза. Системы управления исследовались в различных условиях: без возмущений, в условиях ступенчатых возмущений, ступенчатых периодических с различной частотой, гармонических различной частоты и случайных. Для иллюстрации возможностей указанных систем в их сравнении на рис. 2 представлены графики температуры управляемого объекта в различных системах управления.

Исследования на экспериментальной установке подтвердили теоретически выявленные свойства ОСКУ. Анализ результатов исследования показывает, что в рассматриваемых системах существенно лучшими являются переходные и установившиеся режимы (в том числе в условиях возмущений) по сравнению с широко распространенными в пищевой промышленности линейными и позиционными АСУ.

С целью проверки реализуемости прогнозирующих устройств и их эффективности проведены промышленные испытания системы с прогнозирующими блоками на кондиционере КС-18, расположенном в лаборатории вычислительных машин ОТИИ им. М. В. Ломоносова, и на камерной сушилке СКП-6 комбината хлебопродуктов г. Золотоноши. Испытания подтвердили реализуемость блоков прогноза и возможность в 2,1 раза уменьшить время переходного процесса и в 3,4 раза амплитуду колебаний ошибки выходной величины объекта.

**Основные выводы
и рекомендации**

I. Выявлены особенности оптимального управления, минимизирующего обобщенный компромиссный критерий оптимальности. В частности, доказана его многоступенчатость, что позволяет расширить область возможного применения этого критерия на системы управления,

в которых управляющее воздействие по принципу реализации является многоступенчатым.

2. Аналитически решена задача синтеза ОСКУ объектами второго порядка. Приведенные результаты могут быть использованы в готовом виде при разработке этих систем на практике.

3. Исследовано влияние запаздывания в объекте управления на ОСКУ, где показано улучшение установившегося режима в них по сравнению с оптимальными по быстродействию АСУ и положительное влияние на установившийся режим увеличения числа уровней управляющего воздействия.

4. Предложен метод синтеза прогнозирующих устройств, реализующий идеи прогнозирования фазовых координат, для управления объектами с запаздыванием. Его можно рекомендовать для разработки АСР повышенной точности.

Выявленные свойства блока прогноза от управления позволили предложить одну из возможностей его упрощения. Результаты можно использовать при проектировании прогнозирующих устройств.

5. Исследованы особенности ОСКУ применительно к объектам, динамика которых зависит от знака управляющего воздействия. Даны рекомендации по расчёту таких систем.

6. Обнаружены улучшения свойств АСР в условиях гармонических и случайных возмущений при реализации в управляющем устройстве компромиссного закона управления.

Расчёт дисперсии выходной величины в ОСКУ показал повышение их точности в условиях возмущений на 30% по сравнению с оптимальными по быстродействию АСР. При наличии блоков прогноза точность возрастает в несколько раз.

7. Рассмотрены несколько возможностей упрощения нелинейных оптимальных законов управления и связанного с ним управляющего устройства. Приведенные методики могут быть использованы для синтеза квазиоптимальных АСР.

8. Основные свойства ОСКУ проверены их моделированием на АЕМ МПТ-9 и на экспериментальной установке с физической моделью объекта и выпускаемыми промышленностью элементами автоматики.

Проведено экспериментальное сравнение исследуемых законов управления с распространёнными в пищевой промышленности линейными и позиционными законами. Исследования показали, что при наличии возмущений в системе и запаздывания в объекте оптимальные системы управления с использованием прогнозирующих устройств имеют наилучшие свойства.

Промышленные испытания систем с прогнозирующими устройствами подтвердили реализуемость блоков прогноза и их высокую эффективность.

Областью применения ОСКУ могут быть объекты пищевой промышленности, подверженные глубоким периодическим или случайным возмущениям и допускающим автоколебательный режим.

Кроме этого их применение целесообразно в тех случаях, когда затруднена или невозможна реализация непрерывного управления, а допустима его ступенчатость.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано самостоятельно и в соавторстве в следующих статьях:

1. Синтез систем оптимального по компромиссным критериям управления для объектов пищевой промышленности. Тезисы докладов Республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", Ленинград, 1971.

2. Синтез систем оптимального управления для объектов второго порядка при одном компромиссном критерии. "Электромеханика", №12, 1971.

3. Синтез одного класса оптимальных релейных систем управления объектами второго порядка с запаздыванием. "Электромеханика", №2,

1972.

4. Синтез систем оптимального по компромиссным критериям управления для объектов пищевой промышленности. Сборник материалов Республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", Ленинград, 1972.

5. Синтез оптимальных по компромиссным критериям систем управления линейными объектами. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Организация работы вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления", Киев, 1972.

6. Квазиоптимальный регулятор для локальных систем автоматизированных технологических процессов. Информационный листок Одесского центра научно-технической информации, Одесса, 1972.

7. О синтезе одного класса автоколебательных оптимальных релейных систем управления объектами второго порядка. "Электромеханика", №6, 1973.

8. Синтез одной оптимальной системы управления с двумя управляющими воздействиями при наличии особых управлений. "Кибернетика и автоматическое управление", Киев, 1973.

9. Об одном критерии оптимальности и его применении. "Кибернетика и автоматическое управление", Киев, 1973.

10. Исследование установившихся режимов оптимальных по быстродействию и компромиссному критерию систем управления технологическими объектами в условиях случайных воздействий. Сборник "Технологический прогресс в текстильной промышленности", Херсон, 1973.

11. О методе синтеза оптимальных по компромиссному критерию систем управления объектами с запаздыванием. "Приборостроение", №3, 1974.

12. О применении гармонической линеаризации для исследования одного класса систем управления. "Электромеханика", 1974.

Результаты исследований доложены:

- 1) На научных конференциях ОТИП им. М.В.Ломоносова, 1971-1974гг;
- 2) На Республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности" (июнь 1971 года, г. Ленинград);
- 3) На Республиканской научно-технической конференции "Организация работы вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления" (сентябрь 1972 года, г. Севастополь);
- 4) На семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" (май 1973 года, г. Одесса).