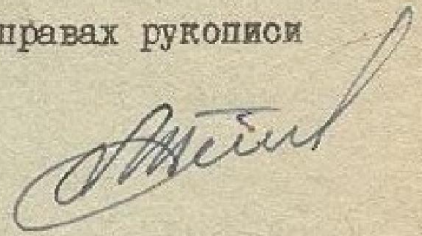


Д В т о р е с т
А 72

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

АНТОНОВ Арнольд Борисович



СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ
РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07 – автоматическое управ-
ление и регулирование, управление технологи-
ческими процессами (пищевая промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1979

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

кандидат технических наук, доцент **ДОЛГОЗВЯТ В.А.**

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук, профессор **КРИНЕЦКИЙ И.И.**

кандидат технических наук, доцент **ПИЧУГИН Е.Д.**

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ВНИО "Пищепроматоматика"

Защита состоится "30" марта 1979 г. в 14 30 час на заседании специализированного совета К 068.35.01 в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова по адресу: 270039, г. Одесса, ул. Свердлова, 112, ОТИП им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан "24" сентября 1979 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

ИИИИИ
g

МИРОНОВ И.С.

ОНАХТ 14.03.11

Синтез и исследовани



v013267

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Принятые на XXV съезде КПСС "Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы" предусматривают меры по повышению эффективности производства. Одна из них заключается в существенном расширении масштабов автоматизации технологических процессов (ТП), агрегатов и производств в различных отраслях промышленности, в том числе и пищевой (ПП). Это ставит перед разработчиками автоматизированных систем управления ряд важных задач по созданию высокоэффективных систем управления, позволяющих наиболее полно реализовать потенциальные возможности ТП и автоматизированных систем.

Известно, что основная величина резерва технико-экономических показателей АСУТП ПП определяется недостаточным уровнем стабилизации технологических режимов, а экономический эффект задач АСУТП находится в прямой зависимости от своевременного создания надежной базы средств контроля и регулирования ТП. Поэтому большинство задач, решаемых при разработке АСУТП ПП относятся в основном к задачам нижнего уровня.

В настоящее время в ПП локальные автоматические системы регулирования (АСР) представлены, в основном, простейшими позиционными и непрерывными системами. Из-за присущего управляемым объектам отрасли существенного запаздывания, сложным образом влияющего на переходные и неавтономные установившиеся режимы в системах, а также случайного характера внешних возмущающих воздействий, функциональная надежность этих систем относительно низкая. Последнее обстоятельство снижает их эффективность в иерархической структуре АСУТП ПП. В этих условиях наиболее эффективными, обладающими высокой функциональной надежностью оказываются быстродействующие релейные системы прогнозируемого управления (БСУ). Разработка и исследование таких систем в связи с изложенным представляется практически

Переучет 19/88 г.

институт пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова *с. в. 13267* v013267

важной задачей.

Объектом исследования в диссертационной работе являются БСПУ объектами с запаздыванием, функционирующие в условиях III.

Цель работы заключается в разработке методов повышения функциональной надежности АСР нижнего уровня АСУТП III и достигается разработкой и всесторонним исследованием БСПУ объектами с запаздыванием.

Методы исследований. Основные теоретические результаты получены на основании использования теории дифференциальных уравнений и метода переходных функций. Для исследований установившихся режимов применялся метод гармонической линеаризации и точечных преобразований. Исследование систем по параметрам функциональной надежности осуществлялось методами статистической динамики. Значительная часть исследований выполнена на основе математического моделирования. Проверка методик расчета и результатов исследований была выполнена на экспериментальной установке с физической моделью управляемого объекта и реальными техническими средствами автоматизации, а также при испытаниях систем в производственных условиях на реальных технологических режимах функционирования оборудования.

Научная новизна работы заключается в совершенствовании методов прогнозированного управления объектами с запаздыванием, а также в сравнительных исследованиях некоторых классов АСР по параметрам функциональной надежности.

Практическая ценность состоит в разработке БСПУ объектами с запаздыванием, обладающих повышенной функциональной надежностью. Системы могут быть использованы при автоматизации ТП пищевой и других отраслей промышленности при больших значениях запаздывания ($\tau/T > 0,3$), когда иные классы систем малоэффективны. Экономический эффект от использования БСПУ ориентировочно составляет:

- для БСПУ температурой нагревателей швов автоматов для розлива молока в тару разового пользования (в предположении, что только 5% потерь молока определяются качеством работы АСР) - 219 тысяч рублей в год в масштабах страны;

- для БСПУ температурным режимом камерной зерносушильной установки (для производительности 500 т в сутки при снижении влажности с 30 до 13% только за счет уменьшения вдвое времени пуска сушилки) - 890 рублей в месяц для одной сушилки.

Реализация работы. Разработанные на основании проведенных исследований БСПУ испытывались в производственных условиях при автоматизации процессов сушки семенного зерна кукурузы в початках в камерной сушильной установке коридорного типа комбината хлебопродуктов в г. Золотоноше Черкасской области, автоматизации процесса кондиционирования воздуха в ВЦ ОТИШ. Кроме того, БСПУ испытывалась на автомате типа А1-АП2Н розлива молока в тару разового пользования.

Эффективность разработанных систем и целесообразность их применения подтверждена актом производственных испытаний.

Апробация работы. Основные теоретические и практические положения работы докладывались и получили одобрение на следующих семинарах и конференциях: XXXI, XXXIII, XXXIV, XXXVI научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИШ (г. Одесса, апрель 1970, ноябрь 1972, апрель 1974, апрель 1977); семинарах "Кибернетика и автоматическое управление" научного Совета по проблеме "Кибернетика" АН УССР (г. Одесса, сентябрь 1974, май 1976); республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности" (г. Ленинград, июнь 1971); республиканской научно-технической конференции по средствам автоматизации и системам управления (г. Севастополь, сентябрь 1972), всесоюзной

научно-технической конференции "Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники" (г. Калинин, май 1977); всесоюзной конференции "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности" (г. Одесса, сентябрь 1977).

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 17 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, приложения, списка использованной литературы, содержащего 144 наименования. Изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 104 рисунка и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертационной работы рассматривается место и значение локальных АСР в АСУТП III, проводится анализ специфических особенностей управляемых объектов в этой отрасли, дается краткий обзор непрерывных, импульсных и релейных АСР объектами с запаздыванием, делаются соответствующие выводы и ставится задача исследований.

Являясь нижним уровнем структурной иерархии АСУТП, локальные АСР в III распространены достаточно широко. От того, насколько надежны и эффективны эти системы, в значительной мере зависит экономический эффект задач АСУТП. Поэтому при разработке АСУТП III к локальным АСР предъявляются достаточно жесткие требования по функциональной надежности, которые существующие системы, как правило, не обеспечивают.

Анализ литературных источников и собственные исследования автора позволили выявить основные факторы, определяющие недостаточную функциональную надежность этих систем.

Детальный анализ некоторых классов АСР с точки зрения возможностей повышения их функциональной надежности позволил сделать

выводы о том, что для объектов с большим запаздыванием простейшие позиционные системы неприменимы из-за больших амплитуд и периода автоколебаний, зависящих от величины запаздывания. Непрерывные системы обладают низкой функциональной надежностью. Импульсные системы обеспечивают удовлетворительное качество регулирования лишь медленно протекающих ТП при детерминированных воздействиях. Наиболее перспективными в условиях III являются оптимальные релейные системы. Обладая всеми основными достоинствами релейных систем, они позволяют значительно повысить точность регулирования по сравнению с позиционными и обеспечивают повышенную функциональную надежность по сравнению с непрерывными системами. Недостатком этих систем является то, что эффективны они при $\tau/T < 0,3$. Обычные методы коррекции таких систем с целью уменьшения отрицательного влияния запаздывания опутимого эффекта не дают.

В силу изложенного можно считать целесообразным постановку следующих задач исследований:

1. Выполнить сравнительный анализ существующих методов коррекции релейных оптимальных систем с целью выявления или разработки наиболее эффективного для систем, функционирующих в условиях III.
2. Провести аналитические исследования выбранного метода коррекции. На его основе синтезировать высококачественные релейные системы.
3. Разработать методику и провести сравнительные исследования быстродействующих релейных и непрерывных систем по показателям качества переходных процессов, а также по параметрам функциональной надежности в установившихся автономных и неавтономных режимах.
4. Проверить методики расчета и определить фактические показатели качества разработанных систем в реальных условиях промышленного производства.

Во второй главе диссертационной работы проводится сравнительный анализ методов коррекции релейных оптимальных систем, доказываются целесообразность дальнейшей разработки метода прогнозирования фазовых координат. Проводятся аналитические исследования, в результате которых получена методика синтеза прогнозирующих устройств в релейных оптимальных системах. Рассматриваются вопросы технической реализации прогнозирующих устройств. В качестве одного из возможных методов коррекции рассматривается применение ПД звеньев в структуре релейных оптимальных систем.

Анализ литературных источников по методам устранения отрицательного влияния запаздывания в релейных оптимальных системах приводит к выводу о целесообразности использования для оптимального управления объектами с запаздыванием метода прогнозирования фазовых координат.

В работе показано, что для объекта $\dot{x} = Ax + Bu_0(t - \tau)$ при известном законе управления этим же объектом без запаздывания $\dot{x} = Ax + Bu_0(t)$ для формирования $u_0(t - \tau)$ необходимо иметь устройство, реализующее $u_0(t)$ и прогнозирующие фазовые координаты, для которых получена зависимость

$$x(t + \tau) = x_n^n + x_u^n,$$

где

$$x_n^n = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\tau) x^i(t),$$

$$x_u^n = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\tau) \int_t^{t+\tau} [\psi^i(\nu) Bu_0(\nu)] d\nu$$

Для получения прогнозируемых от начальных условий фазовых координат x_n^n можно использовать текущие значения переменных объекта. Прогнозируемые от управления переменные x_u^n должны удовлетворять уравнению $\dot{x}_u^n = Ax_u^n + Bu(t) - \Phi Bu(t - \tau)$.

Для их получения необходимо формировать модель объекта без запаздывания, на которую должна подаваться входная величина

$Bu(t) - \Phi Bu(t - \tau)$. Структура блока прогноза k -той фазовой координаты для объекта

$$x = \frac{K_0 e^{-p\tau}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i p^{i-1}} u$$

может быть представлена в виде:

$$x_{kp} = \frac{p^{k-1} \cdot K_0}{\sum_{i=1}^n \alpha_i p^{i-1}} \left[1 - e^{-p\tau} \frac{1}{p^{k-1}} \sum_{i=1}^n A_i^k(\tau) p^{i-1} \right] u + \sum_{i=1}^n A_i^k(\tau) p^{i-1} x_i \quad (I)$$

Для определения значений коэффициентов $A_i^k(\tau)$ в выражении (I) необходимо аналитическое решение уравнений динамики объекта без запаздывания, что при $n > 3$ затруднительно. В работе рассмотрена методика применения АВМ для определения коэффициентов $A_i^k(\tau)$. Составляющие прогнозирования от начальных условий в выражении (I) можно записать:

$$x_k(\tau) = A_1^k(\tau) x_1(0) + A_2^k(\tau) x_2(0) + \dots + A_n^k(\tau) x_n(0).$$

Если на модели объекта без запаздывания установить нулевые начальные условия по всем координатам, а $x_1(0) = I$, то после решения при $t = \tau$ на выходах модели можно зафиксировать следующие величины $A_1^1(\tau) = x_1(\tau)$, $A_2^2(\tau) = x_2(\tau)$, ..., $A_n^k(\tau) = x_n(\tau)$. Аналогично, при $x_2(0) = 1$, $x_1(0) = x_3(0) = \dots = x_n(0) = 0$ при $t = \tau$ получим $A_2^1(\tau) = x_1(\tau)$, $A_2^2(\tau) = x_2(\tau)$, ..., $A_2^k(\tau) = x_n(\tau)$. После k решений будут получены коэффициенты $A_i^k(\tau)$. Методика снимает все ограничения на порядок дифференциального уравнения объекта, а также на его структуру.

Исследования переходных характеристик блока прогнозирования фазовых координат от управления показывают, что они при $t \in [0; \tau]$ совпадают с аналогичными характеристиками объекта без запаздывания, но при $t \geq \tau$ остаются постоянными. На основании этого предложена методика определения на АВМ одновременно всех k составляющих

прогноза от управления. На модели объекта с $\tau = 0$ получают все переходные функции, для чего при $t = \tau$ переводят ее в режим замощивания.

Применение указанных методов при синтезе БСПУ температурой ипения рассола в ВВУ производства пищевой соли "Экстра", температура на контрольной тарелке ректификационной колонны и др. подтвердило их относительную простоту и достаточную точность. Ошибка методов в рассмотренных случаях не превышала 12% относительно аналитического способа определения прогнозируемых координат.

Исследования чувствительности блока прогнозирования к вариациям их параметров показали, что они являются неустойчивыми из-за наличия в их структуре звеньев чистого запаздывания, идеального дифференцирования и интегрирования. Исследование вопросов технической реализации этих устройств позволило определить некоторые способы преодоления указанных трудностей. В работе показано, что передаточная функция звена, формирующего сигнал управления моделью объекта в выражении (1) при $t \in [0; \tau]$ представляет собой прямоугольный импульс длительностью τ , а с $t = \tau$ - сумму переходных функций $K-1$ -го интеграторов и $n-k$ -го дифференциаторов. В результате $n-k$ -го дифференцирования и $K-1$ -го интегрирования прямоугольного импульса с момента $t = \tau$ появляется сумма реакций интегрирующих звеньев и дельта-функций. Реализовать такую переходную функцию звена можно с помощью логического оператора, преобразующего кусочно-постоянную функцию $u(t)$ в сигнал управления моделью объекта по K -той координате. Рассмотренный принцип реализации блока прогноза снимает практически все ограничения по τ и по точности реализации дифференциаторов. Он особенно эффективен при применении в АСУТП управляющих вычислительных машин.

Так как через время τ после момента переключения управления $u(t) x_u^n = const$, а фазовые координаты прогнозируются на время τ , причем переменные x_u^n изменяются на $[t, t + \tau]$ лишь в том случае, когда в течение времени $\tau u_0(t) \neq const$, то каждую из величин $(x_u^n)^i, (i = 1, 2, \dots, n)$ можно получить приближенно на выходе устройства с передаточной функцией

$$W_i(p) = \frac{K_i}{\sum_{j=1}^m T_{ij} p^j}, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Анализ блоков прогнозирования от управления подтверждает возможность их аппроксимации аperiodическими звеньями. Рассмотренный подход к реализации БСПУ является наиболее перспективным применительно к реальным объектам III, т.к. позволяет с помощью введения несложных нелинейных связей в общепромышленные непрерывные регуляторы значительно повысить качество регулирования.

Результаты моделирования БСПУ, построенных с использованием рассмотренных способов реализации блоков прогнозирования, подтверждают целесообразность их применения при решении практических задач.

В работе рассмотрен также вопрос применения корректирующих ПД звеньев в структуре БСПУ. Исследования показали, что введение ПД-корректирующего звена приводит к смещению линии переключения на фазовой плоскости, что эквивалентно прогнозированию на время запаздывания момента переключения управления. Исследована возможность использования реальных дифференциаторов в структуре БСПУ с ПД-коррекцией. Доказана целесообразность реализации дифференциаторов с помощью аperiodических звеньев. Исследована зависимость параметров предельного цикла от коэффициентов передачи этих звеньев и найдены их оптимальные значения.

В третьей главе диссертационной работы проводятся исследования установившихся режимов в БСПУ и исследуются частотные свойства

оптимального регулятора.

При исследовании установившихся режимов в БСПУ применялся метод гармонической линеаризации. В связи с тем, что присущие регулирующей части БСПУ нелинейности не являются типовыми и для них неизвестны коэффициенты гармонической линеаризации, в работе были определены эти коэффициенты и использованы в последующих расчетах. Метод был применен при исследовании БСПУ температурой на контрольной тарелке брагоректификационного аппарата. Погрешность метода гармонической линеаризации составила по амплитуде $\varepsilon_A = 18\%$, по периоду $\varepsilon_T = 12\%$.

Частотным методом был исследован установившийся режим в БСПУ с аппроксимированными блоками прогноза фазовых координат. Получены зависимости амплитуды и периода автоколебаний в предельном цикле от коэффициента передачи и постоянной времени корректирующего звена. При исследовании БСПУ с корректирующим ПД звеном применялся метод точечных преобразований. В работе проведено исследование оптимального регулятора с целью выявления его частотных свойств.

Четвертая глава посвящена исследованию БСПУ на экспериментальной установке с физической моделью управляемого объекта. Приведено описание установки. Изложена постановка задач экспериментальных исследований, методика их проведения и обсуждаются полученные результаты.

Целью исследований являлась проверка методик расчета БСПУ и сравнительная оценка возможностей различных классов АСР объектами с запаздыванием в условиях, характерных для ПШ.

Наличие АВМ и ряда оригинальных технических решений в структуре установки позволили создать исследовательский комплекс, обладающий широкими функциональными возможностями. Установка позволяла проводить исследования систем в следующих режимах: переходных при

детерминированных воздействиях, установившихся автономных, установившихся неавтономных при гармонических и случайных воздействиях. Перечень некоторых из исследованных систем приведен в табл. I.

Таблица I
Результаты исследований АСР на экспериментальной установке

Номер системы	Наименование системы	Оценка дисперсии σ^2		
		возмущающие воздействия		
		синусоидальные	прямоугольные	случайные
1	Линейная	1,534	2,116	0,211
2	Позиционная	38,816	37,064	39,403
3	Релейная с упредителем Смита	0,212	0,498	0,118
4	Оптимальная по быстродействию	8,931	9,412	8,894
5	Б С П У	1,470	2,486	0,297
6	БСПУ с корректирующим звеном	0,434	0,40	0,356
7	БСПУ с упрощенным прогнозированием	0,149	0,170	0,045

Оценка качества работы систем производилась по следующим показателям: а) в переходных режимах - по времени регулирования и по величине динамических ошибок, б) в установившихся режимах - по параметрам функциональной надежности, из которых рассматривались:

σ^2 - оценка дисперсии управляемого параметра, $\omega'_{дмн}$ - параметр потока выходов управляемой величины за допустимое значение, $\omega''_{дмн}$ - параметр потока динамических отказов (выходов за допустимое значение длительностью больше допустимой), $\tau'_{дмн}$ - средняя длительность одного выхода текущего значения управляемого параметра за допустимое значение, $\tau''_{дмн}$ - то же, с учетом допустимой длительности; Π - среднее значение процента времени, в течение которого управляемый параметр будет находиться в пределах допуска; S - средняя площадь выброса; T - наработка на один динами-

ческий отказ; $\omega_{\text{стат}}$ - параметр потока статических отказов;

σ_m^2 - оценка дисперсии среднего значения управляемого параметра и некоторые другие показатели. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

В переходных режимах максимальным быстродействием характеризуется система оптимального быстродействия (4). Наибольшей длительностью переходного режима и динамической ошибкой обладает линейная система I. Динамическая ошибка в системе 7 в 3,8 раза меньше, чем в системе I, в 3 раза меньше, чем в системе 5 и в 1,3 раза меньше, чем в системе 3. Время регулирования в системе 7 в 2,3 раза меньше, чем в системе I, в 1,6 раза меньше, чем в системе 5 и в 1,3 раза меньше, чем в системе 3. Таким образом, по рассматриваемым показателям качества переходного процесса лучшими являются системы 7 и 4.

Из колебательных систем параметры предельного цикла существенно лучше у БСПУ (6). Амплитуда автоколебаний у системы 6 в 9,4 раза меньше, чем у системы 2 и в 4,3 раза меньше, чем у системы 4. Период автоколебаний у системы 6 в 2 раза меньше, чем у системы 2 и в 1,3 раза меньше, чем у системы 4.

На рис. 1 приведены некоторые зависимости, характеризующие рассматриваемые системы по параметрам функциональной надежности. Параметр потока динамических отказов $\omega_{\text{дин}}'$ наименьший у БСПУ (7). Так, например, при допуске $\Delta = 0,5\%$ $\omega_{\text{дин}}'$ у системы 7 в 3 раза меньше, чем в линейной (1), в 2,5 раза меньше, чем в системе 5 и в 1,7 раза меньше, чем в системе 3. При малых значениях допустимого времени выхода управляемой величины за установленное значение параметр потока динамических отказов $\omega_{\text{дин}}''$ наименьший у системы 7. При $t_{\text{доп}} = 0,05$ час $\omega_{\text{дин}}''$ у системы 7 в 1,3 раза меньше, чем у системы I. По всем остальным количественным показателям функциональной надежности БСПУ (7) также является наилучшей.

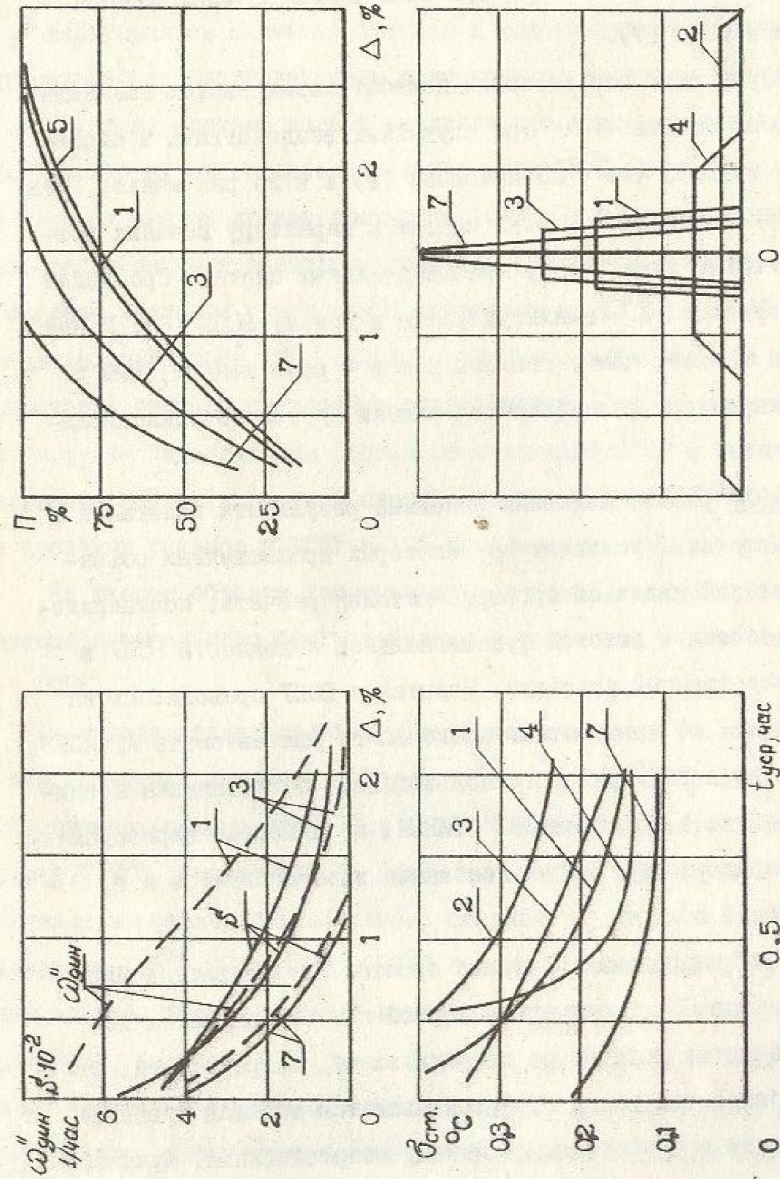


Рис. 1. Результаты исследований АСР на экспериментальной установке

Анализ характера распределения ошибки в рассматриваемых системах показывает, что вероятность минимальных отклонений управляемой величины от нормативного значения при всех видах внешних воздействий наибольшая в БСПУ (7).

Анализ результатов исследований колебательных систем показывает, что дисперсия ошибки σ^2 при случайных воздействиях в системе 6 в 110 раз меньше, чем у позиционной (2) и в 25 раз меньше, чем в системе 4. Чувствительность этих систем к характеру внешних воздействий значительно ниже, чем у неколебательных систем. Сравнение систем по дисперсиям σ_m^2 амплитуд также в пользу БСПУ (6). У нее σ_m^2 в 2,3 раза меньше, чем у системы 2 и в 4 раза меньше, чем у системы 4. По характеру распределения ошибки система 6 также является лучшей.

В пятой главе работы изложены основные результаты испытаний БСПУ в производственных условиях на некоторых промышленных объектах. Целью испытаний являлась проверка методик расчета, подтверждение работоспособности и высокой функциональной надежности БСПУ в реальных производственных условиях. Испытания БСПУ проводилось на следующих объектах: а) нагреватель продольного шва автомата А1-АП2Н для розлива молока в тару разового пользования; б) установка кондиционирования воздуха в помещении ВЦ ОТИППШ; в) камерная зерносушильная установка коридорного типа на комбинате хлебопродуктов в г. Золотоноше Черкасской области.

Первый объект выбран как наиболее простой представитель широкого класса объектов III, характерной чертой которых является использование в качестве источников энергии электронагревателей. Отличительной особенностью таких объектов является высокая чувствительность к внешним воздействиям по каналу энергопитания. Функционирующие в настоящее время в III также объекты оснащены в основном

позиционными АСР, которые в подавляющем большинстве случаев не удовлетворяют технологическим требованиям к качеству ведения процесса.

Испытывались системы: штатная и модернизированная позиционные, оптимальная по быстродействию и несколько вариантов реализации БСПУ. Штатная система даже в условиях автономного режима обеспечивает амплитуду автоколебаний температуры 15°C , в то время как по ТУ на автомат она не должна превышать 10°C . Кроме того, при изменении напряжения питания электронагревателя амплитуда изменяется на 100%, а среднее значение температуры смещается на 13°C . В БСПУ амплитуда автоколебаний менее 1°C , смещение среднего значения при изменении напряжения питания составляет доли градуса. При внешнем воздействии по нагрузке динамическая ошибка не превышает 8°C , а время ее существования 300 с (в штатной системе соответственно 13° , 480 с). Время пусковых режимов в БСПУ в 1,5 раза меньше, чем у штатной системы.

На втором объекте испытывались системы: штатная позиционная, система оптимального быстродействия и несколько вариантов реализации БСПУ.

Испытания проводились при заданном значении температуры 21°C и температурах наружного воздуха 19°C , 24 и 29°C . В штатной системе в автономном режиме при $t_{нв} = 24^{\circ}\text{C}$ амплитуда автоколебаний составила $0,7^{\circ}\text{C}$, период 540 с. При $t_{нв} = 19^{\circ}\text{C}$ амплитуда и период изменились незначительно, однако среднее значение температуры сместилось на $1,5^{\circ}\text{C}$. При $t_{нв} = 29^{\circ}\text{C}$ смещение составило 2°C . В системе оптимального быстродействия амплитуда автоколебаний уменьшилась в 1,75 раза, период в 1,6 раза. Смещение среднего значения осталось таким же, как и у штатной системы. В БСПУ автоколебания практически отсутствуют, а смещение среднего значения, составляя $0,6^{\circ}$ при $t_{нв} = 19^{\circ}\text{C}$ и $0,8^{\circ}\text{C}$ при $t_{нв} = 29^{\circ}\text{C}$ в 2,5 раза меньше, чем в позиционной системе. В условиях пусковых режимов лучшей является систе-

ма оптимального быстродействия, БСПУ незначительно уступает ей.

Непрерывная АСР с ПИД-регулятором, позиционная, оптимального быстродействия и БСПУ испытывались на камерной зерносушильной установке коридорного типа комбината хлебопродуктов в г. Золотоноше Черкасской области при сушке семенной кукурузы в початках. Испытывались системы регулирования агента сушки и системы регулирования температуры зерна.

АСР температуры агента сушки характеризовались следующими показателями качества. В автономном режиме амплитуда колебаний в позиционной системе составила $2,5^{\circ}\text{C}$, период - 165 с, в оптимальной системе соответственно 1°C и 85 с. В БСПУ колебания отсутствуют, максимальное отклонение температуры за время испытаний составило $0,4^{\circ}\text{C}$. В переходном режиме при воздействии по заданию время регулирования составило: в непрерывной АСР - 235 с, позиционной - 290 с, оптимальной - 105 с, БСПУ - 110 с.

АСР температуры нагрева зерна характеризовались следующими показателями качества. В автономном режиме амплитуда автоколебаний в позиционной системе составила 1°C , период - 475 с, в оптимальной системе соответственно $0,5^{\circ}\text{C}$, 206 с. В БСПУ колебания отсутствовали.

В переходных режимах при воздействии по заданию время переходного процесса в непрерывной системе составило 720 с, в позиционной - 625 с, оптимальной - 245 с, БСПУ - 275 с. Динамическая ошибка в непрерывной системе составила $1,9^{\circ}\text{C}$, в БСПУ - $0,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом, в рассмотренных условиях как по динамической, так и по статической точности лучшей является БСПУ.

Приведенные результаты подтверждены протоколом совещания при главном инженере комбината хлебопродуктов в г. Золотоноше от 26 июня 1974 г. и актом производственных испытаний систем от 28 октября 1974 г.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа литературных источников установлены особенности управляемых объектов, характер управляющих и внешних возмущающих воздействий, наиболее представительные типы автоматических стабилизирующих систем в Ш. Выявлены основные факторы, определяющие относительно низкую функциональную надежность АСР в условиях отрасли.

2. Предложен метод синтеза структур БСПУ с применением АВМ для объектов с запаздыванием.

3. Исследована чувствительность прогнозирующих устройств к вариациям их параметров. Предложены способы реализации этих устройств с помощью логических операторов и аппроксимирующих апериодических звеньев.

4. Предложен и исследован метод коррекции быстродействующих релейных систем ПД - корректирующими звеньями. Доказана целесообразность реализации дифференциаторов в структуре этих систем с помощью апериодических звеньев. Исследована зависимость параметров предельного цикла от коэффициентов передачи звеньев и найдены их оптимальные значения.

5. Методами гармонической линеаризации и точечных преобразований исследованы установившиеся режимы в быстродействующих релейных системах. Определены коэффициенты гармонической линеаризации для нетиповых нелинейностей в структуре регулятора. Установлено влияние параметров релейного элемента на качество установившегося режима в системе. Оценена точность приближенных методов исследований.

6. Все результаты аналитических исследований подтверждены моделированием на АВМ.

7. Разработана экспериментальная установка с физической моделью объекта для исследований различных классов АСР в условиях

переходных и установившихся автономных и неавтономных режимов.

8. Разработана методика и проведены сравнительные исследования различных классов АСР на экспериментальной установке в условиях переходных и установившихся автономных и неавтономных режимов при гармонических и случайных воздействиях. Показано, что в рассматриваемых условиях по показателям качества переходных процессов и по количественным оценкам показателей функциональной надежности лучшими являются БСПУ. Эти системы целесообразно применять при $0,2 \leq \tau/T \leq 1$.

9. Наиболее эффективны БСПУ для объектов, характерной чертой которых является необходимость организации управляющих воздействий разрывного характера. Способность БСПУ к компенсации возмущающих воздействий проявляется наиболее полно для тепловых объектов с различными электронагревателями.

10. На основе предложенных методов разработаны и испытаны в производственных условиях следующие БСПУ: температурой нагревателя продольного шва автомата А1-АП2Н для розлива молока в тару разового пользования; температурой кондиционируемого воздуха в помещении ВЦ ОТИШЦ; температурным режимом камерной зерносушильной установки коридорного типа на комбинате хлебопродуктов в г. Золотоноше Черкасской области. Системы обеспечивают высокое быстродействие и малые динамические ошибки в переходных режимах, высокие показатели функциональной надежности в установившихся режимах.

11. Экономический эффект от использования БСПУ ориентировочно составляет: - для БСПУ температурой нагревателей швов автоматов для розлива молока в тару разового пользования (в предположении, что только 5% потерь молока определяются качеством работы АСР) - 219 тысяч рублей в год в масштабах страны; - для БСПУ температурным режимом камерной зерносушильной установки (для производительности 500 т в сутки при снижении влажности с 30 до 13% только за

счет уменьшения вдвое времени пуска сушилки) - 890 рублей в месяц для одной сушилки.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ременный Л.И., Антонов А.Б. Унифицированная система автоматического управления топочными устройствами, работающими на газовом топливе.- В сб.: Тезисы докладов XXII научной конференции ОТИШЦ, посвященной памяти М.В. Ломоносова. Одесса, 1965, с.21-23.

2. Платонов П.И., Ременный Л.И., Антонов А.Б. Автоматическое регулирование влажности и температуры зерна в процессе сушки. "Мукомольно-элеваторная промышленность", 1965, № 1, с.20-25.

3. Ременный Л.И., Антонов А.Б. Новые средства автоматического контроля работы топков на жидком топливе. "Мукомольно-элеваторная промышленность", 1965, № 5, с.24-26.

4. Антонов А.Б., Долгозвяг В.А., Часнык В.Ф. О принципе построения оптимальных по быстродействию систем управления.- "Известия вузов СССР. Приборостроение", 1971, т.ХVI, № 1, с.42-45.

5. Антонов А.Б., Долгозвяг В.А. Об оптимальном по быстродействию управлении объектами пищевой промышленности с запаздыванием.- В сб.: "Тезисы докладов Республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности". Л., 1971, с.160.

6. Долгозвяг В.А., Антонов А.Б. Об оптимальном по быстродействию управлении объектами с запаздыванием в пищевой промышленности.- В сб. материалов республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности". Л., 1972, с.278-281.

7. О методах самонастройки оптимальных релейных систем управления.- В сб.: "Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении", Вып.12, Изд-во Львов, ун-та, 1972, с.25-31. Авторы: Антонов А.Б., Гонтарь О.Д., Деревянко П.Ф., Долгозвяг В.А.

8. Долгозвяг В.А., Антонов А.Б., Лузин И.В. Оптимальное по быстродействию управление объектами с запаздыванием.- В сб.: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции "Организация работы вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления". Киев, 1972, с.92-93.

9. Долгозвяг В.А., Антонов А.Б. Система управления температурным режимом зерносушильной установки.- "Механизация и автоматизация

управления", 1972, № 4, с.22-24.

10. Квазиоптимальный релейный регулятор для локальных систем автоматизированных технологических процессов.- Информационный листок, УкрНИИТИ, 1973, серия 16/6, с.4.

11. Антонов А.Б., Долгозвяг В.А., Федунец П.Д. О методе синтеза оптимальных по компромиссному критерию систем управления объектами с запаздыванием.- "Известия вузов СССР. Приборостроение", 1974, т.ХУП, № 3, с.33-37.

12. Исследование быстродействующих систем прогнозируемого управления объектами с запаздыванием в условиях возмущений.- "Известия вузов СССР. Электромеханика", 1976, № 4, с.454-459. Авторы: Антонов А.Б., Гонтарь О.Д., Долгозвяг В.А., Федунец П.Д., Хобин В.А.

13. Автоматическая система регулирования температуры зерна в камерных сушилках.- "Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность", 1976, № 5, с.28-29. Авторы: Долгозвяг В.А., Антонов А.Б., Гонтарь О.Д., Федунец П.Д., Хобин В.А.

14. Об одном принципе коррекции систем с разрывным управлением.- В препринте-76-7, "Синтез элементов и систем автоматики на базе ЭВМ", изд. инст-та кибернетики АН УССР, Киев, 1976, с.19-24. Авторы: Долгозвяг В.А., Антонов А.Б., Федунец П.Д., Хобин В.А.

15. Опыт практической реализации систем оптимального быстродействия. "Монтаж и наладка средств автоматизации и связи", ЦЕНТИ, серия УШ, 1977, выпуск № 99, с.21-23. Авторы: Долгозвяг В.А., Антонов А.Б., Гонтарь О.Д., Федунец П.Д., Хобин В.А.

16. Долгозвяг В.А., Антонов А.Б., Федунец П.Д. О целесообразности применения релейных систем управления при автоматизации процессов сушки зерна.- В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники" (г. Калинин, май 1977), М., 1977, с.59-62.

17. Антонов А.Б. Быстродействующие релейные системы управления объектами с запаздыванием (на примере гидротермической обработки зерна).- В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности", Одесса, 1977, с.71-72.