

Автор ер.

Г 65

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

---

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Аспирант ГОНТАРЬ Олег Дмитриевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ  
С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИК ИХ РАСЧЕТА  
ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07. Автоматическое управление  
технологическими процессами пищевой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ОДЕССА — 1975

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
У С С Р

Одесский технологический институт пищевой промышленности  
имени М.В. Ломоносова

ОНАХТ 14.07.11  
Теоретические и эксп



v012495

На правах рукописи

Аспирант Гонтарь Олег Дмитриевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ  
ОПТИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИК  
ИХ РАСЧЕТА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07. Автоматическое управление техноло-  
гическими процессами пищевой про-  
мышленности.

АВТОРЕФЕРАТ

Пересчет 19/87 г.

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1975

v.0 12495

Одесский технологический  
институт пищевой промыш-  
ленности

Б И Б Л И О Т Е К А

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова на кафедре "Автоматизация производственных процессов".

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор П.Н.Платонов,  
кандидат технических наук, доцент В.А.Долгозвяг.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Н.М.Чумаков,  
кандидат технических наук, доцент Ф.А.Самонов.

Ведущее предприятие - Всесоюзное научно-производственное объединение "Пищепромавтоматика".

Автореферат разослан "20" марта 1975 г.

Защита диссертации состоится "25" апреля 1975 г. на заседании ученого совета факультета автоматизации и приборостроения Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим направлять по адресу: 270039, ул.Свердлова, 112, ОТИПП им.М.В.Ломоносова. *Ученому секретарю совета*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

К.Т.Н.

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Внедрение прогрессивной технологии и интенсификация технологических процессов в пищевой промышленности требуют повышения быстродействия существующих систем на основе применения последних достижений теории автоматического управления.

Цель работы. Исследование систем оптимального быстродействия и разработка методик их расчета применительно к объектам пищевой промышленности.

Научная новизна. Состоит в определении потенциальных возможностей оптимальной по быстродействию системы управления и решении задачи ее параметрического синтеза с учетом особенностей объекта управления и управляющего устройства.

Практическая ценность. Заключается в разработке методик расчета систем оптимального быстродействия применительно к объектам пищевой промышленности. В получении таблиц оптимальных настроек регулятора, которые можно непосредственно применить на практике.

Экономическая эффективность. Полученные в работе результаты доказывают возможность применения для решения задачи оптимального быстродействия технических средств, выпускаемых промышленностью. Это позволяет без особых материальных затрат существенно расширить сферу применения систем с разрывным управлением, экономическая эффективность которых хорошо подтверждена практикой применения релейных систем в пищевой промышленности. Кроме того, экономическая эффективность может быть получена за счет улучшения качества регулирования нестационарных объектов, подверженных возмущениям, объектов, допускающих только релейное управление (электронагревательные печи, холодильные установки и т. д.), повышения производительности процессов периодического действия (паро-

варочные камеры, коптильни и т.д. ) .

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка общим объемом 153 страниц машинописного текста с 105 рисунками и приложениям объемом в 15 страниц.

Дальнейшее создание в нашей стране материально-технической базы коммунизма основано на развитии эффективных производств во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в пищевой промышленности. Развитие таких производств возможно в результате широкого внедрения современного высокопроизводительного оборудования, применения прогрессивных технологических схем, совершенных систем автоматического управления технологическими процессами и аппаратами.

Развитие автоматизации, как характеристики эффективности производства, идет в направлении разработки новых автоматических систем, а также в направлении совершенствования существующих средств автоматизации. Наряду с перспективностью первого направления актуальность второго подтверждается тем, что совершенствование существующей автоматизации без особых затрат может дать существенный экономический эффект. Значимость последнего особенно возрастает в пищевой промышленности, насчитывающей большое число предприятий.

В теории автоматического управления в последнее время все больше внимания уделяется автоматическим системам регулирования (АСР) с разрывным управлением. Использование максимальных управляющих воздействий позволяет повысить эффективность автоматических устройств (оптимальные по быстродействию системы управления - ОБСУ) и надежность их работы, а также снизить стоимость и требования к их эксплуатации (позиционные системы). ОБСУ, обладающая свойствами позиционных и линейных систем, сочетает в себе быстро-

действие, устойчивость, простоту и надежность с одной стороны, а также точность установившихся режимов с другой. Возможность возникновения скользящих режимов в ОБСУ позволяет применить системы оптимального быстрогодействия для управления нестационарными объектами. Кроме того, скользящие режимы позволяют получить сигналы управления, которые можно использовать для целей адаптации ОБСУ.

В настоящее время в пищевой промышленности основу автоматических систем регулирования составляют позиционные и линейные системы. При этом электронные регуляторы, реализующие линейные законы регулирования, являются регуляторами релейного действия, в которых осуществляется предельная форсировка выходного сигнала. Это позволяет, применив теорию оптимальных управлений, при соответствующих условиях, осуществить в реальных АСР (позиционных и при необходимости линейных) оптимальные или близкие к оптимальным по быстроддействию переходные процессы.

В настоящий период теория оптимального быстрогодействия получила широкое развитие и отражена в многочисленных статьях и монографиях. Однако препятствием практического внедрения ОБСУ является отсутствие тщательного анализа и методик их расчета в условиях, присущих, например, объектам пищевой промышленности. Решению этих вопросов в определенных пределах и посвящена данная работа.

## ГЛАВА I.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Начало теоретического исследования ОБСУ было положено А.А. Фельдбаумом в 1949г., хотя этому предшествовали практические сис-

темы, близкие к оптимальным, еще в 1935г. Дальнейшие работы А.А. Фельдбаума, Я.З.Цыпкина, Д.Бушау и др. внесли существенный вклад в развитие теории оптимального быстродействия. Разработанный Л.С.Понтрягиным и его учениками принцип максимума, а также метод динамического программирования Р.Беллманом явились основной математической базой решения задач оптимального быстродействия.

Начиная с 60-х годов, в литературе появилось большое количество работ, посвященных ОБСУ. Это свидетельствует о том большом интересе, который проявляют специалисты в области автоматики к теории и практике ОБСУ, а также о множестве еще нерешенных в этом направлении проблем. В монографиях Ю.Т.Антамонова, А.А.Павлова, А.В.Репникова, А.А.Фельдбаума и др. сконцентрированы основные подходы к решению задач оптимального быстродействия. Однако, несмотря на научные результаты, принципиально решающие задачи ОБСУ, в каждом конкретном случае требуются специальные исследования с учетом особенностей реальных систем.

Согласно данным ВНПО "Пищепромавтоматика" большинство объектов управления в пищевой промышленности описываются математической моделью, состоящей из апериодического звена I-го порядка с запаздыванием. В совокупности с исполнительным механизмом размерность линейной части системы возрастает до второго порядка, синтез ОБСУ которой хорошо известен. Однако, как показали результаты исследований, объекты пищевой промышленности обладают такими особенностями, как нестационарность, инерционность, запаздывание, несимметрия динамических характеристик. Что касается управляющего устройства, то обычный синтез ОБСУ приводит к получению функции управления с нелинейными преобразованиями по производной. Применение же линейных функций управления может существенно упростить практическую реализацию управляющего устройства. Таким образом, наличие реаль-

ных характеристик объекта управления и управляющего устройства в результате известной "негрубости" ОБСУ приводит к далеко не наилучшим переходным процессам. Следовательно, требуется определенная организация системы управления, основанная на базе известных методов синтеза и коррекции ОБСУ, а также исходя из возможностей существующей в промышленности аппаратуры. Отсюда вытекают следующие задачи исследований.

1. Получить удобную для исследования математическую модель ОБСУ, учитывающую особенности объекта управления и управляющего устройства.

2. Исследовать динамику полученной математической модели:

- а) в идеализированных условиях с целью получения основных соотношений параметров регулятора, позволяющих осуществлять необходимые переходные режимы, а также для разработки методики расчета нестационарных ОБСУ;
- б) с реальными характеристиками стационарного объекта управления и управляющего устройства для определения их влияния на переходные процессы и для разработки методики расчета оптимальных настроек ОБСУ по переходным процессам.

3. Исследовать работу ОБСУ в установившемся режиме с целью разработки методик расчета их оптимальных настроек.

4. Изучить работу ОБСУ и дать методики расчета параметров их движений в условиях гармонических и случайных возмущений.

5. Основные теоретические результаты и методики расчета проверить моделированием на АВМ.

6. На основании разработанных методик дать расчет конкретных систем.

7. Провести сравнительное исследование позиционных, ОБСУ, ОБСУ с прогнозом и линейных систем управления на эксперименталь-

ной установке с целью определения конкурентоспособности ОБСУ. Проверить в промышленных условиях реализуемость систем оптимального быстрого действия, методик их расчета и основные теоретические результаты.

### Математическая модель ОБСУ

При составлении математической модели используем следующие допущения:

Объект управления (линейная часть системы) — интегрирующее и апериодическое звено с запаздыванием. Датчики фазовых координат считаем безынерционными и линейными. Такие допущения возможны, так как постоянные времени объекта управления в большинстве случаев на несколько порядков выше постоянной времени датчиков. Кроме того, предусматривая режим стабилизации, мы можем полагать линейность датчиков.

Уравнение объекта управления:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \dot{x} &= u; \quad \text{при } u = 1(t-\tau) + \frac{G_1}{B} \\ \gamma \ddot{x} + \dot{x} &= u; \quad \text{при } u = -1(t-\tau) + \frac{G_2}{B} \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{T_1}{T_2 K} (\ddot{q}(t) + q(t) - Kf(t-\tau)); \\ G_2 &= \frac{T_1}{T_2 K} (\ddot{q}(t) \cdot \gamma + q(t) - Kf(t-\tau)). \end{aligned}$$

Уравнение регулятора

$$u = \begin{cases} 1(t-\tau) + \frac{G_1}{B}; & \text{при } \begin{cases} \sigma_{12} < 0 & \dot{\sigma}_{12} > 0; \\ \sigma_{21} < 0 & \dot{\sigma}_{21} < 0; \end{cases} \\ 0(t-\tau) + \frac{G_1}{B}; & \text{при } \sigma_{12} > 0 > \sigma_{23}; \text{ и } \dot{\sigma}_{12} > 0 \text{ либо } \dot{\sigma}_{23} > 0; \\ 0(t-\tau) + \frac{G_2}{B}; & \text{при } \sigma_{21} > 0 > \sigma_{32}; \text{ и } \dot{\sigma}_{21} < 0 \text{ либо } \dot{\sigma}_{32} < 0; \\ -1(t-\tau) + \frac{G_2}{B}; & \text{при } \begin{cases} \sigma_{32} > 0 & \dot{\sigma}_{32} < 0; \\ \sigma_{23} > 0 & \dot{\sigma}_{23} > 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $G_{12} = \Psi + m\Delta$ ;  $G_{32} = \Psi - m\Delta$ ;  
 $G_{23} = \Psi - \Delta$ ;  $G_{21} = \Psi + \Delta$ ;

$$\Psi = x + \eta_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \dot{x} - \frac{\eta_0 \cdot 1}{\lambda_1} \ln(1 + |\dot{x}| \lambda_2) \cdot \text{sign } \dot{x}; \quad (3)$$

$$\eta_n = \begin{cases} \eta_0 & \text{при } \dot{x} > 0; \\ 1 & \text{при } \dot{x} < 0; \end{cases} \quad \lambda_2 = \frac{K T_1^*}{K^* T_2}; \quad \lambda_1 = \lambda_2 \frac{T_2}{T_2^*}$$

$K, T_1, T_2$  - реальные параметры объекта управления;

$K^*, T_1^*, T_2^*$  - расчетные параметры регулятора;

$\eta_0$  - коэффициент несимметрии, характеризующий изменение  $T_2$  объекта при различном по знаку управляющем воздействии;

$\eta_n$  - коэффициент несимметрии линии управления;

$m, \Delta, \Delta_1$  - параметры релейного элемента.

Формулы перехода к размерным величинам

$$\xi = \frac{K B T_2 x}{T_1}; \quad \dot{\xi} = \frac{K B \dot{x}}{T_1}; \quad \ddot{\xi} = \frac{K B \ddot{x}}{T_1 T_2}; \quad (4)$$

$$\tau_1 = \tau T_2; \quad t_1 = t \cdot T_2;$$

Уравнение движения системы:

параметрические

$$x = x_0 + \eta \dot{x}_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \left(t + \eta e^{-\frac{t}{\tau}} - \eta\right) u;$$

$$\dot{x} = \dot{x}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) u; \quad (5)$$

фазовые

$$x = x_0 + \eta \dot{x} - \eta \dot{x} + \eta u \ln \frac{-\dot{x}_0 + u}{-\dot{x} + u}; \quad (6)$$

При движении изображающей точки ИТ (рис. I)

I. По листу управления № I

$$\eta = 1; \quad u = 1(t - \tau) + \frac{C}{B}$$

По листу управления № 2

$$\eta = 1; u = 0(t - \tau) + \frac{G_1}{B}; \text{ при переходе с листа № 1 на № 2}$$

$$\eta = \eta_0; u = 0(t - \tau) + \frac{G_2}{B} \text{ при переходе с листа № 3 на № 2}$$

3. По листу управления № 3

$$\eta = \eta_0; u = -1(t - \tau) + \frac{G_2}{B};$$

ОБСУ является существенно нелинейной системой, поэтому дальнейшие исследования системы (1+6) проводились с использованием ЭЦВМ.

## ГЛАВА II.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБСУ

Исследования методом фазовой плоскости идеализированных ( $\tau=0$ ;  $\eta_0 \neq 1$ ;  $G_{1,2} = 0$ ) ОБСУ нестационарными объектами позволили получить условия существования оптимальных, скользящих и колебательных режимов в функции параметров объекта управления и управляющего устройства. Определены зависимости степени оптимальности  $M = \frac{t_{реальн.}}{t_{опт.}} = f(\lambda_1; \lambda_2)$  и величины перерегулирования  $B = f_1(\lambda_1; \lambda_2)$  в плоскости параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Последние учитывают как изменение параметров объекта управления, так и особенности управляющего устройства (например, аппроксимацию линии управления). Полученные зависимости позволили разработать методику решения задач анализа и синтеза нестационарных ОБСУ. В задаче анализа по заданным диапазонам изменения параметров объекта управления и неидеальностям управляющего устройства определяется степень оптимальности системы и величина перерегулирования. Задача синтеза - по заданной степени оптимальности и величине перерегулирования определяются требования к возможному диапазону изменения параметров объекта и

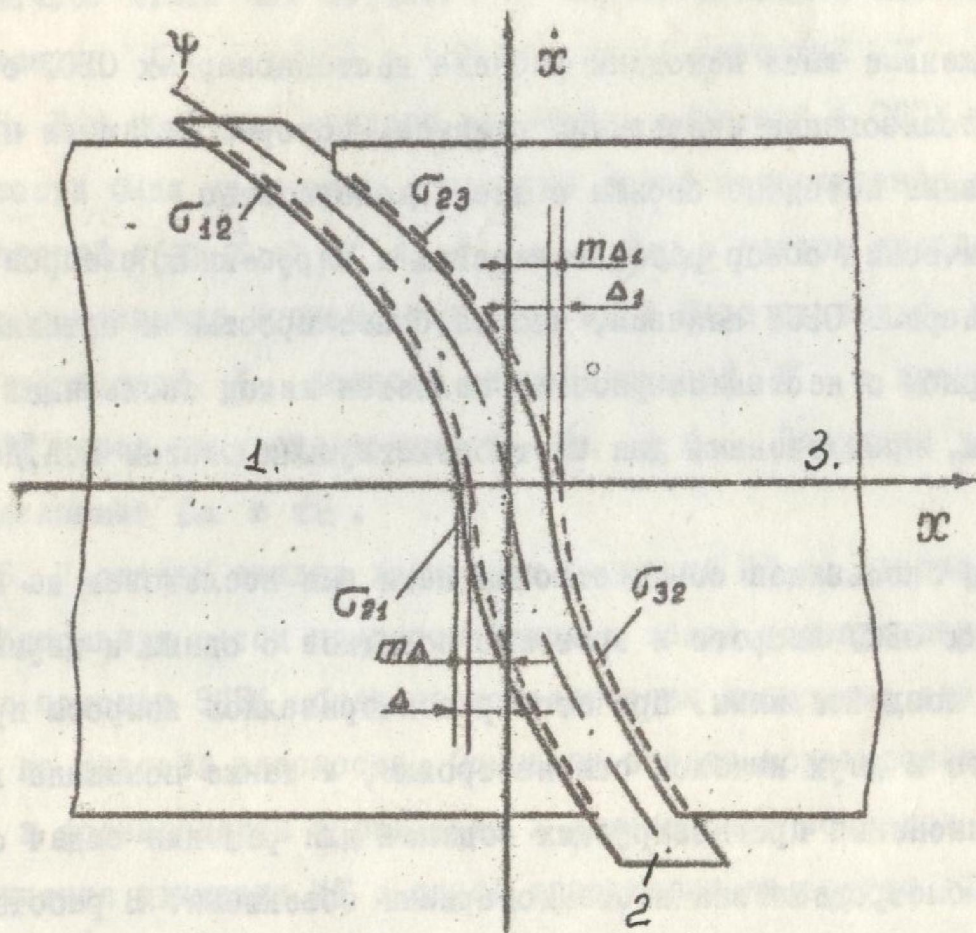


Рис. I.

управляющему устройству. Полученные методики расчета могут быть перенесены на расчет нестационарных ОБСУ с реальными характеристиками.

Изложенные выше методики расчета нестационарных ОБСУ основаны на использовании скользящих режимов, которые являются простым, но пассивным методом борьбы с нестационарностью.

Критический обзор работ советских и зарубежных авторов по нестационарным ОБСУ показал, что наиболее простым и активным методом борьбы с нестационарностью является метод скользящей самонастройки, предложенный для быстродействующих систем В.А. Долгозвонгом.

Метод скользящей самонастройки нами был исследован на идеализированных ОБСУ второго и третьего порядков с одним и двумя управляющими воздействиями. При этом рассматривались вопросы применения одного и двух каналов самонастройки, а также показана возможность применения прогнозирующих моделей для решения задач оптимального быстрого действия нестационарными объектами. В работе приведены качественные и количественные соотношения рассматриваемых систем, показывающие эффективность метода скользящей самонастройки.

Исследования идеализированных ОБСУ явились основой для анализа работы систем оптимального быстрого действия с реальными характеристиками. Для этого был применен метод математического моделирования поведения ИТ на фазовой плоскости с помощью ЭЦВМ, чему предшествовали решения следующих задач:

1. Получены уравнения линий управления компенсированного запаздывания  $\Psi_k(x, \dot{x}, \eta_n, \tau) = 0$ .

2. На основании анализа полученных линий  $\Psi_k$  была решена задача компенсации запаздывания с использованием зоны нечувствительности релейного элемента и обычной линии управления  $\Psi(\lambda_1, \lambda_2,$

$x, \dot{x}, \varphi_n) = 0$ . При этом коэффициенты  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определялись из условия аппроксимации  $\Psi_k$  совмещенной с ней линией  $\Psi$ . В конечном итоге был осуществлен параметрический синтез линий управления  $\sigma$  (рис. 1) для диапазона значений  $\tau$ .

3. Для простоты анализа возможных движений в ОБСУ на фазовой плоскости были получены уравнения линий переключения фазовых траекторий  $\gamma(x, \dot{x}, \varphi_n, \tau, \lambda_1, \lambda_2, \Delta, \Delta_1) = 0$ , с учетом нулевого значения управляющего воздействия. При этом было показано, что структура уравнений  $\gamma$  зависит от соотношений  $\tau$  и времени движения ИТ через нечувствительность  $t_a$  и  $t_c$ . Получены уравнения, определяющие  $t_a$  и  $t_c$ .

5. Проведен анализ возможных движений ИТ на фазовой плоскости.

Используя метод припасовывания и закон формирования управления с помощью ЭЦМ, были промоделированы возможные движения системы на фазовой плоскости. Основная задача моделирования заключалась в формировании управления и определении моментов времени переключения движения ИТ с одной траектории на другую. Точнее, необходимо определять начальные условия движения в узлах припасовывания. Таковыми являются значения фазовых координат, управление движением системы, необходимый коэффициент несимметрии для каждой траектории движения и соответствующей линии управления.

Проведенные исследования поведения ИТ на фазовой плоскости с помощью ЭЦМ "Раздан-2" позволили определить оптимизируемые коэффициенты регулятора, ими являются  $\lambda_1, \lambda_2$  и ширина зоны нечувствительности релейного элемента. По переходным процессам получены таблицы оптимальных настроек регулятора с линейными и нелинейными функциями управления.

Полученные теоретические результаты подтверждены моделированием ОБСУ на аналоговой вычислительной машине типа МПТ-9.

### ГЛАВА III.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ОБСУ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИХ ПАРАМЕТРОВ

При решении задач оптимального быстрогодействия существенным является взаимосвязь между переходными и установившимися режимами. В связи с этим возникает задача качественной и количественной оценки параметров установившегося режима.

Исследования проводились методом точечных преобразований и методом гармонической линеаризации.

Применение метода гармонической линеаризации вызвано необходимостью исследовать случаи, когда регулятор, рассчитанный для объекта второго порядка, управляет объектом высокого порядка.

При исследовании точным методом несимметрия фазового портрета требует полного точечного преобразования. Функции, полученные в результате полного обхода контура преобразования, выражаются системой трансцендентных уравнений и требуют для их решения применение ЭЦВМ. Особенностью полученных аналитических зависимостей, связывающих амплитуду и частоту автоколебаний с параметрами объекта и регулятора, является изменение их структуры в зависимости от того, запаздывание в системе больше или меньше времени прохождения ИТ зоны нечувствительности релейного элемента на фазовой плоскости.

Кратко изложим основные результаты теоретических исследований:

- Проведенные теоретические исследования позволили получить оптимальные настройки регулятора на автономный установившийся режим. Эффективность ОБСУ с оптимальными настройками регулятора достигает максимума при  $\tau = 0,2$ . При  $\tau > 0,8$  эффективность оптимальных настроек незначительна, что свидетельствует о необходимости при больших запаздываниях применения ОБСУ с прогнозированным управле-

нием.

- Позиционная система по параметрам установившихся движений существенно уступает ОБСУ с оптимальными настройками (особенно при малых  $\tau$ ).

- При определенной зоне нечувствительности в ОБСУ наступает срыв автоколебаний. Оптимальные настройки на 25% меньше той величины зоны нечувствительности, при которой происходит срыв автоколебаний.

- Полученные результаты исследований ОБСУ с линейными функциями управления дают основание утверждать о целесообразности применения их на практике.

- Исследования установившихся режимов ОБСУ несимметричными объектами показали, что в системе возникает статическая ошибка, величина которой растет с ростом запаздывания. Статическая ошибка может быть скомпенсирована расчетной величиной уставки регулятора, если последний рассчитан на симметричный объект. Регулятор, учитывающий несимметрию объекта управления, должен иметь релейный элемент с соответствующей несимметрией зоны нечувствительности, а также учитывать коэффициент несимметрии в самой линии управления.

- Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать регулятор с учетом несимметрии объекта управления.

- Погрешность метода гармонической линеаризации для исследования установившихся режимов ОБСУ не превышает 10%.

- Основные результаты главы представлены в виде графиков и таблиц, которые могут быть использованы непосредственно на практике.

Моделирование ОБСУ на аналоговых машинах подтвердило правиль-

ность полученных теоретических результатов и выводов.

## ГЛАВА IУ.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ОБСУ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИХ ПАРАМЕТРОВ

Автоматическое управление большинством технологических объектов пищевой промышленности осуществляется при наличии возмущающих воздействий, имеющих случайный характер. При этом целый ряд объектов характеризуется интегральными оценками значений выходных параметров, для которых допустимы кратковременные отклонения, не превышающие аварийные, либо не допускающие больших экономических потерь. Характер изменения выходных параметров объекта управления близок к случайному стационарному процессу с нормальным законом распределения и количественной оценкой может служить дисперсия регулируемого параметра.

Многопараметричность объектов пищевой промышленности, естественно, обуславливает множество каналов управления, находящихся во взаимном влиянии. При этом возникает задача исследования этих явлений с целью пренебрежения ими, либо необходимостью введения взаимных компенсирующих связей. Системы управления в пищевой промышленности обычно работают в режиме стабилизации. Поэтому, не касаясь сложных форм вынужденных колебаний, нами были рассмотрены возможные одночастотные колебания ОБСУ, обычно называемые в литературе "захватом", обусловленные внешним гармоническим воздействием.

Для исследования ОБСУ в случайных воздействиях был использован метод статистической линеаризации. Методом гармонической линеаризации исследовалась работа ОБСУ в условиях гармонических

возмущений.

В диссертации изложена методика применения статистической линеаризации к исследованию ОБСУ с реальными характеристиками. В таблицы сведены расчетные формулы, связывающие дисперсию регулируемой величины с параметрами входного возмущения, объекта управления и регулятора. Для гармонических возмущений получена система уравнений, позволяющая определить возможность захвата ОБСУ внешним гармоническим воздействием в зависимости от параметров объекта управления, регулятора и возмущения.

В процессе исследования получены следующие основные результаты:

- При изменении дисперсии возмущения от максимума до нуля, дисперсия регулируемого параметра изменялась от конкретной величины до величины дисперсии автоколебаний автономной системы. Это подтверждает целесообразность применения статистической линеаризации для исследования ОБСУ.

- Минимум дисперсии регулируемой величины соответствует параметрам настройки регулятора, при которых в автономном режиме происходит срыв автоколебаний. Поэтому рекомендуются настройки регулятора, при которых еще не происходит срыв автоколебаний ОБСУ в автономном режиме. Полученные в работе графики срывов автоколебаний позволяют определить эти параметры.

- Получены таблицы, которые могут быть использованы при расчете точности ОБСУ в случайных воздействиях.

- Оптимальные настройки для автономного режима ОБСУ сужают зону "захвата" в плоскости амплитуды и частоты возмущающего воздействия и смещают границы "захвата" в область высоких частот. Показано, что ОБСУ более устойчива к захвату, чем позиционная система.

V. O 124 95

Полученные теоретические результаты подтверждены моделированием ОБСУ на АВМ типа МПТ-9, дополненной генераторами случайных и гармонических сигналов.

### ГЛАВА У.

#### ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБСУ

Цель данной главы - показать на конкретных примерах применение разработанных методик расчета ОБСУ, провести сравнительные исследования на экспериментальной установке линейных позиционных и систем оптимального быстрогодействия, проверить реализуемость последних на реальных объектах с реальной аппаратурой.

Основные результаты, полученные в работе, могут быть продемонстрированы на одном из конкретных примеров.

Пример. Определить параметры движения системы стабилизации концентрации сернистой кислоты по каналу "Расход воды, подаваемой на башню - концентрация сернистой кислоты", а также параметры управляющего устройства при следующих исходных данных.

Передаточная функция объекта управления и привода:

$$W(p) = \frac{B \cdot K \cdot e^{-p\tau_1}}{T_1 p (T_2 p + 1)}; \quad \frac{B}{T_1} = \frac{\% \text{ХУМ}}{60 \text{ сек}}; \quad K = 4.5 \cdot 10^{-3} \frac{\% \text{SO}_2}{\% \text{ХУМ}}$$

$$\tau_1 = 185 \text{ сек.}$$

$$T_2 = 840 \text{ сек.}$$

Возмущение - стационарный центрированный случайный процесс с следующими параметрами экспоненциальной корреляционной функции.

$$D_f = 11 (\% \text{ХУМ})^2$$

$$\alpha_1 = \frac{0.028}{60} \text{ сек}^{-1}$$

Приведем исходные данные к безразмерному виду

$$\tau = \frac{\tau_1}{T_2} = 0.22;$$

$$\alpha = \alpha_1 \cdot T_2 = 0.392$$

$$D = D_f \left( \frac{T_1}{B T_2} \right)^2 = 0.056$$

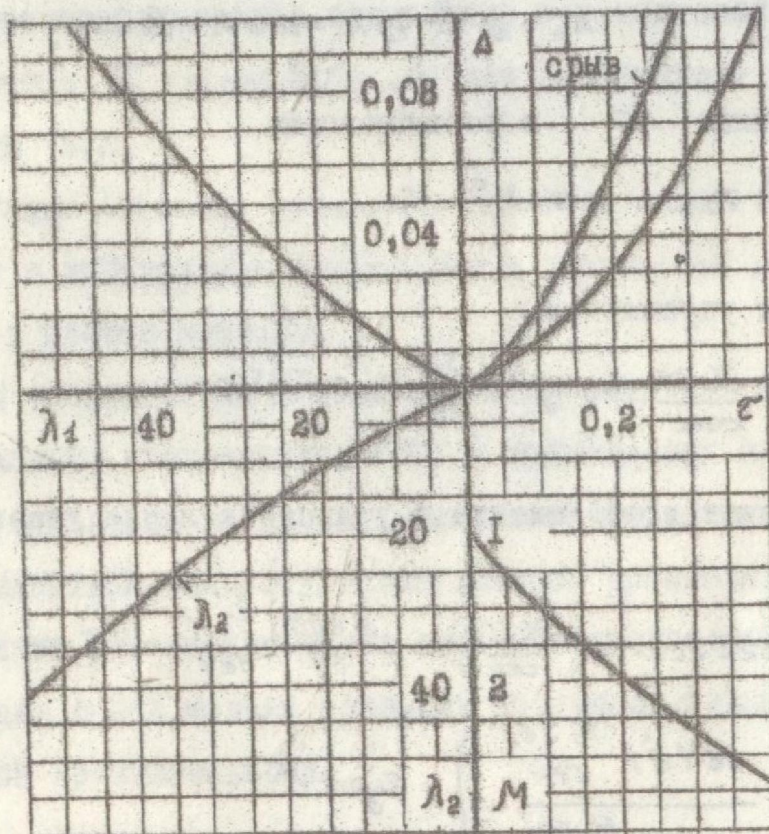
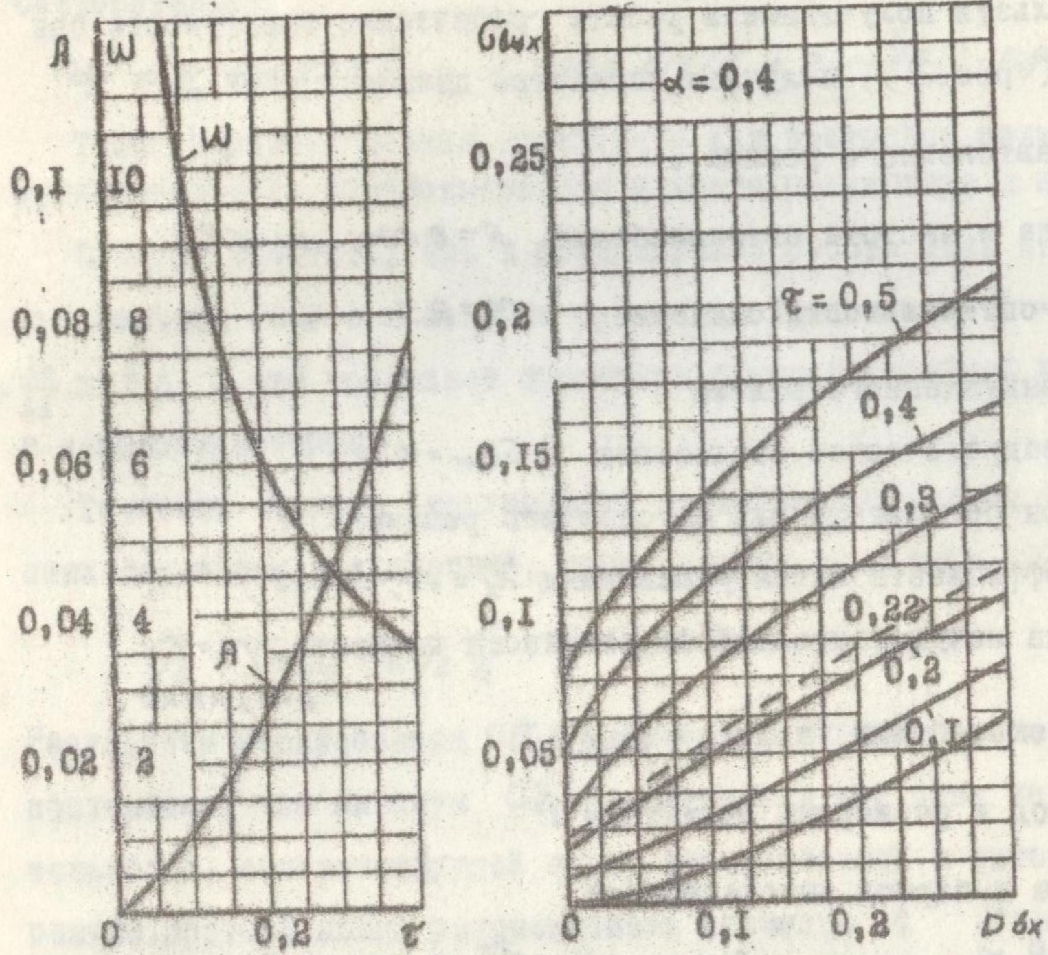


Рис. 2

Используя полученные в работе графические зависимости при  $\zeta = 0.22$  (рис. 2), получаем параметры движения ОБСУ.

Для автономного режима :

Амплитуда и частота автоколебаний  $A = 0.026$ ;  $\omega = 5.8$ ;

Степень оптимальности системы  $M = 2.1$ ;

Для вынужденного режима :

Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\text{вн}} = 0.04$ ;

Параметры регулятора для автономного режима -

- коэффициенты линии управления  $\lambda_1 = 24$ ;  $\lambda_2 = 15$ ;

- зона нечувствительности релейного элемента  $m = 1$

$$\Delta = \Delta_1 = 0.034.$$

Срыв автоколебаний при  $\Delta = 0.064$ .

Переход к размерным величинам .

Амплитуда и период автоколебаний

$$A_p = A \cdot \frac{B}{T_1} T_2 K = 0.0016 \% 50_2 ; T_p = \frac{2\pi}{\omega} \cdot T_2 = 910 \text{ сек.}$$

Зона нечувствительности  $\Delta_p = \Delta \frac{B}{T_1} T_2 K = 0.0019 \% 50_2 ;$

Относительная единица  $x$  в размерностях

$$\varepsilon = x \cdot \frac{B}{T_1} T_2 K = 0.003 \% 50_2 ;$$

Коэффициенты линии управления

$$\frac{BK^*}{T_1^*} = \frac{BK}{T_2 \lambda_2} = \frac{0.0003 \% 50_2}{60 \text{ сек}} ; T_2^* = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} T_2 = 525 \text{ сек.}$$

Подставляя полученные коэффициенты в уравнение линии управления получаем

$$\psi = \varepsilon (\% 50_2) + 525 \text{ сек} \cdot \dot{\varepsilon} \left( \frac{\% 50_2}{\text{сек}} \right) - \frac{0.0003 \% 50_2}{60 \text{ сек}} \cdot 525 \text{ сек} \cdot$$

$$\cdot \text{en} \left( 1 + \frac{60 |\dot{\varepsilon}| \frac{\% 50_2}{\text{сек}}}{0.0003 \frac{\% 50_2}{\text{сек}}} \right) \cdot \text{sign } \dot{\varepsilon} ;$$

Следовательно,

$$\psi = \varepsilon + 525\varepsilon - 0,0026 \ln(1 + 2 \cdot 10^5 |\varepsilon|) \cdot \operatorname{sign} \varepsilon,$$

Таким образом, данных достаточно для настройки нелинейного функционального преобразователя и всего регулятора в целом.

Следует отметить, что в реферируемой работе даны аналогичные расчеты ОБСУ с линейными функциями управления  $\psi = x + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \dot{x} \pm \Delta$ , что позволяет применить обычный серийный регулятор с дифференциатором.

Точность системы, настроенной на автономный режим в условиях случайных воздействий, определяется следующим образом

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_{\text{вх}} \cdot k T_2 \frac{B}{T_2} = 0,0025 \% \text{ } \sigma_{02}.$$

Результаты исследования ОБСУ в условиях случайных воздействий показывают, что минимум  $\sigma_{\text{вх}}$  получается при зоне нечувствительности, соответствующей срыву автоколебаний в автономном режиме. Поэтому можно рекомендовать значение  $\Delta$ , близкое к зоне срыва, т.е.  $\Delta < 0,064$ . При этом  $\sigma_\varepsilon < 0,0025 \% \text{ } \sigma_{02}$ . Среднеквадратическое отклонение регулируемой величины без регулятора  $\sigma_\varepsilon = 0,013 \% \text{ } \sigma_{02}$ . Отсюда коэффициент подавления ОБСУ равен 5,2.

Таким образом, данный пример показывает относительную простоту и доступность применения в инженерных расчетах, предложенных в работе методик.

В соответствии с поставленными задачами были проведены сравнительные исследования ОБСУ и применяемых на практике законов регулирования на экспериментальной установке с использованием стандартной аппаратуры, выпускаемой промышленностью. В качестве объекта управления взята электроннагревательная печь, представляющая собой модель тепловых процессов, распространенных в пищевой промышленности.

Экспериментальная установка позволяла реализацию следующих законов управления: позиционного, оптимального быстрогодействия, линейного ПИД-закона с настройкой на апериодический переходный процесс, 20% и 40% перерегулирования. Кроме того, была предусмотрена экспериментальная реализация ОБСУ с прогнозированием, использующая идеи О.Г. Варшавского и др. Для нелинейных систем рассматривалось управление объектом с интегрирующим исполнительным механизмом, а также с пропорциональным исполнительным механизмом.

Рассматриваемые системы управления исследовались в автономном режиме, а также в условиях ступенчатых, гармонических, прямоугольных и случайных возмущений. Ввиду сложности обработки полученных результатов работы исследуемых систем в качестве критерия их сравнения взяты время переходных процессов и величина наибольшей ошибки регулирования.

Результаты исследования показали, что ОБСУ по времени переходного процесса в 1,66 раза лучше линейной, настроенной на граничный переходный процесс, и в 3,3 раза - настроенной на апериодический процесс.

В установившемся автономном режиме соотношения амплитуд автоколебаний позиционной системы и ОБСУ равно 2. Для этих систем с пропорциональным исполнительным механизмом это соотношение равно 2,3.

Исследования вынужденных установившихся режимов показали, что система оптимального быстрогодействия существенно лучше позиционной и близка по выбранному критерию оценки к линейной системе.

Следует отметить, что для объектов управления с пропорциональным исполнительным механизмом возможности ОБСУ ограничены с ростом  $\tau$ . Более широкими возможностями обладают ОБСУ с прогнозированием фазовых координат. Проведенные экспериментальные исследования этой системы показали ее высокую эффективность, превос-

ходящую по всем показателям остальные рассматриваемые системы. Однако практическому применению ОБСУ с прогнозом должны предшествовать тщательные исследования с позиций чувствительности этих систем и разработки методик их расчета.

Наиболее достоверной оценкой работы ОБСУ является ее исследование в промышленных условиях. Экспериментальные исследования проведены на системах кондиционирования воздуха в помещении и стабилизации температуры энергоносителя в камерной сушилке корридорного типа.

Пример температурной стабилизации системы кондиционирования воздуха на базе кондиционера КС-18 характерен тем, что в данном случае не может быть применена линейная система регулирования. Сравнительные исследования штатной позиционной системы, позиционной системы, реализованной на стандартном электронном регуляторе ОБСУ и ОБСУ с прогнозом дали следующие результаты:

- а/ по амплитуде автоколебаний  $2^{\circ}\text{C}$ ;  $1,1^{\circ}\text{C}$ ;  $0,4^{\circ}\text{C}$ ;  $0,12$ .
- б/ по периоду автоколебаний  $12 \cdot 10^3 \text{сек}$ ,  $3 \cdot 10^3 \text{сек}$ ,  $180 \text{сек}$ ,  $30 \text{сек}$ .

Приведенные результаты характеризуют возможности рассматриваемых систем для управления статическими объектами второго порядка с запаздыванием и пропорциональным исполнительным механизмом.

На Золотоношском мелькомбинате Черкасской области была испытана ОБСУ стабилизации температуры сушильного агента в камерной сушилке корридорного типа. Задачей эксперимента являлась проверка методик расчета ОБСУ и ее реализуемость в промышленных условиях.

Эксперимент показал, что расхождение расчетных данных и практических результатов не превышает 16% по амплитуде и 16,5% по периоду автоколебаний установившегося режима.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенные в диссертационной работе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В результате анализа особенностей объектов пищевой промышленности и состояния теории оптимальных систем получена математическая модель, позволяющая разработать единую процедуру исследования ОБСУ с линейными и нелинейными функциями управления.

2. Предложены методики решения задач анализа и синтеза нестационарных ОБСУ, использующих скользящий режим. Показана возможность применения метода скользящей самонастройки для управления нестационарными объектами второго и третьего порядка с одним и двумя управляющими воздействиями.

3. Изучено влияние реальных характеристик управляющего устройства и особенностей объекта управления на переходные процессы в ОБСУ и дана методика расчета ее оптимальных настроек.

4. Используя метод точечного преобразования, получены аналитические зависимости для определения амплитуды и частоты автоколебаний, величины среднего смещения ошибки, выбора оптимальных настроек системы в автономном режиме. Показана применимость метода гармонической линеаризации и предложена система уравнений для определения параметров автоколебаний автономных ОБСУ для объектов высокого порядка.

5. Предложена методика применения статистической линеаризации для исследования точности работы ОБСУ. Предлагается настраивать регулятор на граничную величину зоны нечувствительности, при которой еще не происходит срыв автоколебаний в автономном режиме. Методом гармонической линеаризации изучены особенности работы ОБСУ в условиях гармонических возмущений. Получена система уравне-

ний, позволяющая определить условия "захвата" ОБСУ внешним гармоническим возмущением.

6. Основные результаты теоретических исследований, полученных расчетом на ЭЦВМ, подтверждены моделированием на аналоговых вычислительных машинах типа МПТ-9 с применением блока нелинейностей и блока запаздывания.

7. Используя предложенные в работе методики, выполнен расчет ОБСУ для вакуум-сушильной установки и сарнистой станции.

8. Теоретические исследования ОБСУ с линейными функциями управления позволяют в качестве ОБСУ применить обычный промышленный электронный регулируемый блок с дифференциатором.

На экспериментальной установке со стандартной аппаратурой проведено исследование линейных, позиционных, ОБСУ, ОБСУ с прогнозом. Показана практическая реализуемость и конкурентоспособность ОБСУ с прогнозом по отношению к линейным системам.

9. Исследование ОБСУ на системе кондиционирования воздуха показало практическую реализуемость ОБСУ для двухемкостных объектов. Промышленные испытания ОБСУ камерной сушилкой на Золотоношском мелькомбинате Черкасской области с использованием стандартной аппаратуры подтвердили работоспособность системы и применимость методики расчета.

Таким образом, представленные методики расчета и практическая реализуемость ОБСУ позволяют рекомендовать их к практическому использованию в пищевой промышленности.

Основное содержание диссертации опубликовано в соавторстве в следующих работах

1. Об одном методе самонастройки оптимальной по быстродействию системы управления. "Кибернетика и автоматическое управление". Академия наук Украинской ССР, Киев, 1968.
2. О прогнозировании в задачах оптимального по быстродействию управления объектами с переменными параметрами. "Кибернетика и автоматическое управление". Академия наук Украинской ССР, Киев, 1968.
3. Исследование алгоритма самонастройки оптимальной по быстродействию системы управления объектом с переменными параметрами. "Приборостроение", Изв. вузов, № 4, II, 1970.
4. Метод скользящей самонастройки в оптимальных по быстродействию системах управления. "Электромеханика". Изв. вузов, № 9. Новочеркасск, 1971.
5. О методе оптимального по быстродействию управления нестационарными объектами пищевой промышленности. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", Ленинград, 1971.
6. Квазиоптимальный релейный регулятор для локальных систем автоматизированных технологических процессов. Информационный листок УкрНИИТИ Госплана УССР. Серия 16/6, 1972.
7. О методах самонастройки оптимальных релейных систем управления. Научно-технический сборник "Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении", № 9, Львов, 1972.
8. О методе оптимального по быстродействию управления нестационарными объектами в пищевой промышленности. Сборник материалов

Республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", Ленинград, 1972.

9. Исследование установившихся режимов оптимальных по быстродействию и компромиссному критерию систем управления технологическими объектами в условиях случайных воздействий. Сборник "Технический прогресс в текстильной промышленности", Херсон, 1978.

10. О применении гармонической линеаризации для исследования одного класса систем управления. "Электромеханика", Изв. вузов, № 5, 1974.

11. Об оптимальном по быстродействию управлении нестационарными объектами. "Адаптивные системы автоматического управления" № 2, Киев, 1974.

Результаты работы должны:

1. На научных конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова в 1971-1974гг.

2. На республиканской научной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и пищевой промышленности", июнь 1971 г., Ленинград.

3. На республиканской научно-технической конференции "Организация работы вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления", сентябрь 1972 г., Севастополь.

4. На семинаре "Кибернетика и автоматическое управление", Одесское отделение, 1972.