

Автореф.  
с 14  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

Инж. САМОНОВ Ф. А.

Перечисл. 19.87

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ  
И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА  
РАСЧЕТА АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗИ-  
РУЮЩИХ СИСТЕМ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

(Специальность № 05.198 — Автоматизация  
производственных процессов)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Одесса-1969

сн

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР**

**ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА**

**Инж. САМОНОВ Ф. А.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ  
И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА  
РАСЧЕТА АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗИ-  
РУЮЩИХ СИСТЕМ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**(Специальность № 05.198 — Автоматизация  
производственных процессов)**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук**

**Одесса-1969**

0001733

**Одесский технологический  
институт  
им. М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА**

Работа выполнена во Всесоюзном проектно-конструкторском и научно-исследовательском институте автоматизации пищевой промышленности "Пищепромавтоматика".

**Научные руководители:**

доктор технических наук, профессор *П. Н. Платонов*.

кандидат технических наук *В. В. Владимиров*

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор *Ю. Е. Рузский*

кандидат технических наук, доцент *Б. И. Леончик*

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский экспериментально-конструкторский институт продовольственного машиностроения «ВНИЭКИПродмаш», г. Москва

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1969 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1969 г. на заседании Совета Одесского технологического института имени М.В. Ломоносова. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИ.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах направлять по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112 - Технологический институт имени М.В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

(*Л. А. Запорожец*)

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация процессов тепло- и массообмена обусловила в последние годы широкую автоматизацию пищевой промышленности.

Возросшие требования к качеству пищевой продукции требуют наилучших, оптимальных решений в смысле точности ведения автоматическими устройствами технологических процессов.

Важную роль в решении этого вопроса должны сыграть инженерные методы проектирования и расчета оптимальных автоматических систем.

Задачу создания оптимальных автоматических систем можно рассматривать и как строго математическую, вариационную (синтез оптимальных регулирующих устройств) и как инженерную (анализ систем заданной структуры).

В первом случае на основе строгой математической постановки и решения вариационной задачи получают научно обоснованную оптимальную систему. Это направление бурно развивается, разработаны интересные методы аналитического конструирования оптимальных регулирующих устройств, получены интересные практические результаты. Вместе с тем методам синтеза присущи некоторые недостатки. Возникающая в каждом случае проблема физической и технической реализуемости научно обоснованной оптимальной системы иногда заставляет отклоняться от полученных математических результатов.

Во втором случае задача решается другим путем. Инженер, имея определенный арсенал технических средств, на основе накопленного опыта и предварительного исследования, используя приближенные теоретические методы,

создает систему, которая удовлетворяет поставленным техническим требованиям. И если используемые приближенные методы гибки и обладают достаточной общностью, то полученное инженерное решение сравнимо с оптимальным.

Широкое распространение аналоговых и цифровых вычислительных машин придает особое значение развитию простых приближенных методов расчета, которые делают возможной оценку исследуемых процессов, позволяют выбрать структуру системы и определить наивыгоднейшие (оптимальные) настройки регуляторов.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию точности и разработке рекомендаций по выбору законов регулирования и метода расчета оптимальных настроек регуляторов (реализующих выбранный закон регулирования) широко внедряемых в пищевой промышленности автоматических стабилизирующих систем.

Постановка задачи в отраслевом плане связана со следующим.

Во-первых, накопленный к настоящему времени в пищевой промышленности объем данных о реальных возмущениях позволяет с достаточной степенью достоверности определить класс наиболее вероятных возмущающих воздействий и установить пределы изменения их характеристик.

Во-вторых, автоматические системы пищевой промышленности в отличие от общепромышленных, как правило, подвержены, наряду с основным (регулируемым) возмущением, влиянию одного или нескольких нерегулируемых возмущений.

К ним относятся: погрешность приборов автоматического контроля качественных параметров сред пищевой промышленности, случайные низкочастотные изменения качественных параметров перерабатываемого сырья (влажности, вязкости, мутности, содержания сухих веществ) и др.

Результаты исследования сформулированы в удобном для практических расчетов виде.

Для определения оптимальных настроек регуляторов разработана программа, с помощью которой за одну-пять минут могут быть определены оптимальные настройки на широко распространенной ЭЦВМ "Минск-22". В работе приведены таблицы оптимальных настроек типовых регуляторов широкого класса систем пищевой промышленности, рассчитанных по указанной программе.

Для случаев, когда использовать ЭЦВМ не представляется возможным или когда задача решается в первом приближении (нерегулируемые возмущения не учитываются) получены простые формулы для инженерной оценки оптимальных настроек.

Предложен простой и удобный метод определения суммарной автокорреляционной функции нескольких нерегулируемых возмущений, воздействующих на систему.

Разработанные методы использовались при расчете внедренных и эксплуатируемых в настоящее время в пищевой промышленности конкретных автоматических стабилизирующих систем.

Диссертация содержит 160 страниц текста, 29 таблиц, 26 рисунков и приложение.

# 1. ОБЗОР РАБОТ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЛУЧАЙНЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ, И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первой главе приводится обзор работ в области исследования точности автоматических систем, находящихся под влиянием случайных воздействий, и анализ существующих инженерных методов определения оптимальных настроек регуляторов, обсуждается вопрос выбора критерия оптимальности, формулируется задача исследования.

Показано, что исследование точности автоматических стабилизирующих систем, содержащих объекты, аппроксимированные типовыми звеньями I порядка, и регуляторы, реализующие типовые законы регулирования, выполнено частично:

- а) исследовано влияние некоторых типовых законов регулирования на величину дисперсии регулируемого параметра в случае объекта с большой постоянной времени;
- б) исследовано влияние чистого запаздывания на дисперсию регулируемого параметра в случае объектов типа звена чистого запаздывания;
- в) частично рассмотрены вопросы построения системы регулирования для объектов I порядка с запаздыванием.

В части расчета оптимальных настроек регулятора при случайных воздействиях теория автоматического регулирования располагает рядом методов, разработанных В.В. Солодовниковым, Б.В. Булгаковым, А.А. Красовским, Ф.А. Михайловым и др. Обладая рядом положительных моментов, эти методы во многих случаях практического использования могут оказаться сравнительно сложными и громоздкими.

В деле разработки инженерных методов расчета оптимальных настроек регуляторов сделано еще недостаточно много.

В первой главе диссертации приведены также сводные данные об объектах регулирования, автоматических системах и возмущающих воздействиях в пищевой промышленности. Сводные данные получены в результате изучения и обработки большого экспериментального материала, накопленного институтом: "Пищепромавтоматика". Анализ сводных данных позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее распространены в пищевой промышленности линейные непрерывные одномерные автоматические стабилизирующие системы (рис. 1), построенные на базе общепромышленных регуляторов (свыше 80%);

- объекты регулирования аппроксимированы типовыми звеньями: аperiodическим звеном I порядка (23,3%) и аperiodическим звеном I порядка и звеном чистого запаздывания (66,6%);

- наиболее вероятные возмущения - случайные воздействия, представляющие собой стационарные случайные процессы с низкочастотным спектром и нормальным законом распределения.

Автокорреляционные функции возмущений аппроксимированы экспоненциальными функциями (66%) или экспоненциально-косинусными функциями (34%). Сводные данные получены путем анализа характерной выборки, состоящей из более чем 180 систем и 200 реализаций возмущений, записанных в условиях нормальной эксплуатации технологического оборудования.

С учетом изложенного, основные задачи исследования формулируются следующим образом:

1. Получение и проверка на аналоговых вычислительных машинах зависимостей, связывающих дисперсию регулируемого параметра (принятую оценку динамической точности) на выходе типовых линейных непрерывных одномерных автоматических стабилизирующих систем, находящихся под влиянием случайных возмущений, с параметрами систем и статистическими характеристиками возмущений.

Возмущения представляют собой нормальные стационарные случайные процессы с автокорреляционными функциями вида экспоненциальной или экспоненциально-косинусной функции.

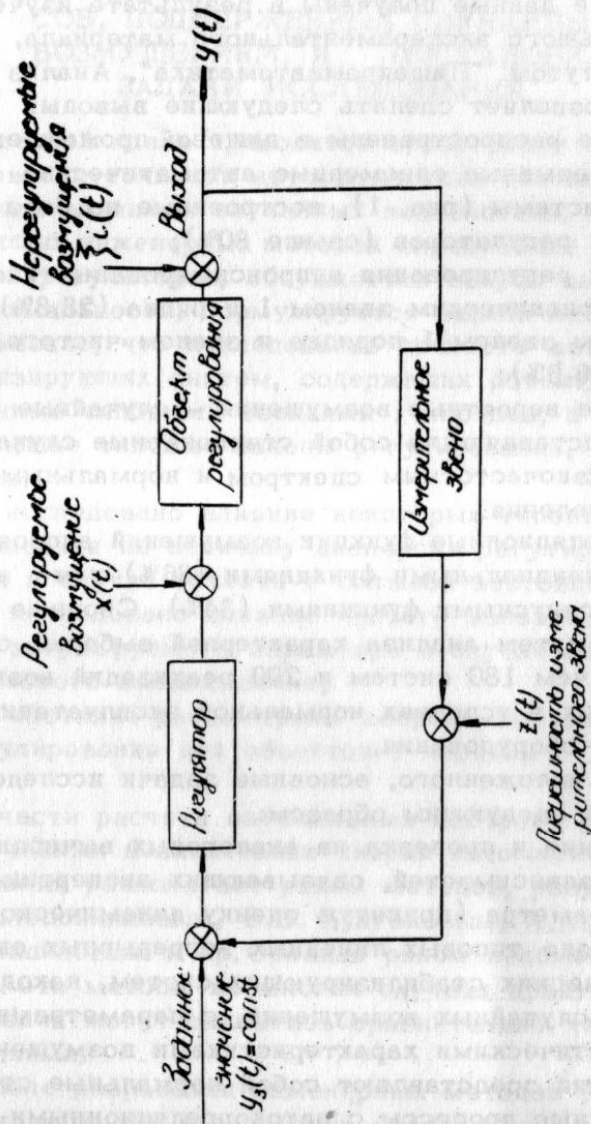


Рис. 1. Структурная схема автоматической стабилизирующей системы

2. Исследование влияния на дисперсию регулируемого параметра:

- типовых законов регулирования;
- коэффициента спада ( $\gamma$ ) и резонансной частоты ( $\Omega$ ) автокорреляционных функций возмущений;
- настроек регуляторов ( $K_p, T_i, T_d$ );
- чистого запаздывания в объекте ( $\tau_0$ );
- нерегулируемых воздействий.

3. Разработка рекомендаций по выбору наиболее эффективного закона регулирования и инженерного метода расчета оптимальных (в смысле минимума дисперсии регулируемого параметра) настроек регуляторов автоматических стабилизирующих систем пищевой промышленности.

4. Проверка разработанных методов путем расчета, моделирования на АВМ и опытной эксплуатации конкретных автоматических стабилизирующих систем.

## II. ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСТАНОВИВШИЕСЯ ЗНАЧЕНИЯ ДИСПЕРСИИ РЕГУЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА В СЛУЧАЕ ОБЪЕКТА ТИПА АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА 1 ПОРЯДКА

В главе II изложена методика вывода основных соотношений, связывающих дисперсию регулируемого параметра с параметрами системы и статистическими характеристиками возмущающих воздействий.

Дисперсия регулируемого параметра определяется путем вычисления суммы интегралов выражений для спектральных плотностей аддитивных составляющих дисперсии от регулируемого и нерегулируемого (например, погрешности измерительного звена) возмущений.

Получены в общем виде зависимости, определяющие составляющие дисперсии регулируемого параметра на выходе типовых АСС в случае объекта типа апериодического звена 1 порядка. Зависимости приведены в таблицах 1 и 2.

Установившиеся значения  
составляющей ДРП от возмущения

$$R_{xx}(z) = D_x e^{-\delta_1/z}$$

Таблица 1

Тип регулятора	Значения коэффициентов		Резицирчетый объект типа оперирующего звена I порядка	
	Индекс	A		B
Статический	m-1	$T_0$	$\frac{\kappa+1}{T_0}$	$D_{yux} = \frac{\kappa^2}{A_m^2 B_m (\gamma + B_m)} D_x$
Статический с преобразованием	m-2	$T_0 + \kappa T_g$	$\frac{\kappa+1}{T_0 + \kappa T_g}$	
Асплатический	n-1	$T_u T_0$	$T_u$	$D_{yux} = \frac{\kappa^2 T_u^2 \gamma}{B_n (A_n \gamma^2 + B_n \gamma + \kappa)} D_x$
Узодронный	n-2	$T_u T_0$	$T_u (\kappa+1)$	
Узодронный с преобразованием	n-3	$T_u (T_0 + \kappa T_g)$	$T_u (\kappa+1)$	

Установившиеся значения  
составляющей ДРП, порожденной  
погрешностью ИЗ

$$R_{zz}(z) = D_z e^{-\delta_1/z}$$

Таблица 2

Тип регулятора	Значения коэффициентов				Резицирчетый объект типа оперирующего звена I порядка
	Индекс	A	B	Г	
Статический	m-1	$T_0$	$\frac{\kappa+1}{T_0}$	0	$D_{yuz} = \frac{\kappa^2 (1 + \gamma_m \delta_1 + B_m)}{A_m^2 B_m (\delta_1 + B_m)} \cdot \frac{D_z}{\kappa^n}$
Статический с преобразованием	m-2	$T_0 + \kappa T_g$	$\frac{\kappa+1}{T_0 + \kappa T_g}$	$T_g^2$	
Асплатический	n-1	$T_u T_u$	$T_u$	0	$D_{yuz} = \frac{\kappa}{B_n} \cdot \frac{B_n \kappa}{A_n^2} \delta_1^2 + (T_u \frac{\kappa}{A_n})^2 \cdot \gamma_n \frac{\kappa}{A_n} \cdot \frac{D_z}{\kappa^n}$ $\frac{\delta_1^2 + \frac{B_n}{A_n} \delta_1 + \frac{\kappa}{A_n}}{\kappa^n}$
Узодронный	n-2	$T_u T_u$	$T_u (\kappa+1)$	$T_u^2$	
Узодронный с преобразованием	n-3	$T_u (T_0 + \kappa T_g)$	$T_u (\kappa+1)$	$T_u (T_0 + \kappa T_g)$	

Составляющие дисперсии выражены через параметры объекта ( $K_0$ ,  $T_0$ ), регулятора ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), измерительного звена ( $K_1$ ), дисперсию ( $D_x$ ) и коэффициент спада автокорреляционной функции ( $\gamma$ ) регулируемого возмущения, дисперсию ( $D_z$ ) и коэффициент спада автокорреляционной функции ( $\gamma_1$ ) нерегулируемого возмущения. Обобщенный коэффициент передачи системы ( $K$ ) равен произведению коэффициентов передачи объекта, регулятора, измерительного звена ( $K_0 \cdot K_p \cdot K_1$ ).

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ АСС, СОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТЫ ТИПА АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА 1 ПОРЯДКА

Глава III посвящена исследованию влияния на дисперсию регулируемого параметра типовых законов регулирования, параметров системы и характеристик возмущений и разработке инженерного метода расчета типовых АСС, содержащих объекты типа апериодического звена 1 порядка.

В начале главы приведены результаты проверки на электронной моделирующей установке типа МНБ зависимостей таблиц 1 и 2. В качестве регулируемого и нерегулируемого возмущений при проверке были выбраны две статистически независимые псевдослучайные последовательности из 300 точек каждая. Распределение последовательностей близко к нормальному (проверка проводилась по критерию  $\chi^2$  и дала значение 13,468).

Проверка подтвердила согласие результатов расчета по зависимостям таблиц 1 и 2 и результатов моделирования.

Анализ зависимостей показал существенное влияние типовых знаков регулирования на дисперсию регулируемого параметра.

Более глубокий математический анализ зависимостей таблиц 1 и 2 позволил сделать вывод о возможности, в некоторых случаях, заменить сложный закон регулирования столь же эффективным, но более простым законом, и следовательно, сложный регулятор — простым, т.е. более надежным и менее дорогостоящим. Разработаны рекомендации по выбору наиболее простого закона регулирования, обеспечивающего требуемую точность регулирования. В качестве критерия для выбора закона регулирования использовано критическое значение коэффициента спада автокорреляционной функции регулируемого возмущения ( $\gamma_{кр}$ ), при котором дисперсия остается одинаковой для двух различных законов регулирования.

В общем виде значение этого коэффициента определяется формулой

$$\gamma_{кр} = \frac{\sqrt{[(A_m B_m)^2 - (\frac{B_n}{T_u})^2]^2 + 4K \frac{B_n}{T_u^2} (A_m B_m - \frac{A_n B_n}{T_u^2}) - [(A_m B_m)^2 - (\frac{B_n}{T_u})^2]}}{2(A_m^2 B_m - \frac{A_n B_n}{T_u^2})}, \quad (1)$$

где  $A_m$ ,  $B_m$ ,  $A_n$  и  $B_n$  — коэффициенты таблиц 1.

Сравнение с помощью выражения (1) эффективностей регулирования различными регуляторами, реализующими типовые законы регулирования, показало, что при

$$\gamma > \gamma_{кр} = \frac{\sqrt{(K+2)^2 + 4 \frac{T_0}{T_u}} - (K+2)}{2 T_0}$$

эффективность регулирования статическим регулятором значительно выше чем астатическим.

Статический с предварением и изодромный регуляторы равноэффективны при следующем соотношении временных настроек регуляторов  $T_u = 1/\gamma^2 T_g$  и эффективнее статического и астатического регуляторов.

Наиболее эффективными являются пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы.

Вместе с тем, при достаточно больших величинах постоянной времени объектов введение в закон регулирования производной не приводит к заметному уменьшению дисперсии регулируемого параметра.

Выведены формулы соотношений параметров АСС, при которых обеспечивается заданная точность регулирования по составляющей дисперсии от регулируемого возмущения (Дух). Формулы приведены в таблице 3. Выбирая из неравенств таблицы 3 наиболее простое, удовлетворяющееся при заданном значении приведенной ошибки регулирования (М) и параметрах регулятора, допускаемых условиями физической реализуемости и асимптотической устойчивости, можно найти искомый закон регулирования.

В процессе исследования влияния на дисперсию регулируемого параметра нерегулируемого возмущения установлена экстремальная зависимость дисперсии от коэффициента передачи регулятора (Кр).

График зависимости  $D_u = f(K_p)$  в общем случае имеет вид (рис. 2)

Таблица 3

Закон регулирования	Соотношения параметров АСС
П	$K_p \geq \frac{\sqrt{\gamma^2 T_g^2 + 4Ma - (a+1)}}{2K_0 K_n}$
ПД	$K_p \geq \frac{\sqrt{(a+c)^2 + 4ac(M-1) - (a+c)}}{2cK_0 K_n}$
И	$K_{PI} = \frac{K_p}{T_u} \geq \frac{\gamma a (M-1)}{K_0 K_n}$
ПИ	$K_p \geq \frac{\sqrt{(\beta+d)^2 + 4\beta d(M-1) - (\beta+d)}}{2\beta K_0 K_n}$
ПИД	$K_p \geq \frac{\sqrt{(a+e+1)^2 + 4d(\beta+e)(M-1) - (a+e)}}{2(\beta+e)K_0 K_n}$

Обозначения:  $a = \gamma T_0 + 1$ ;  $\beta = \gamma T_u + 1$ ;  $c = \gamma T_g + 1$ ;  $d = (\gamma T_g + 1) \gamma T_u$   
 $e = (\gamma T_g + 1) \gamma T_u$

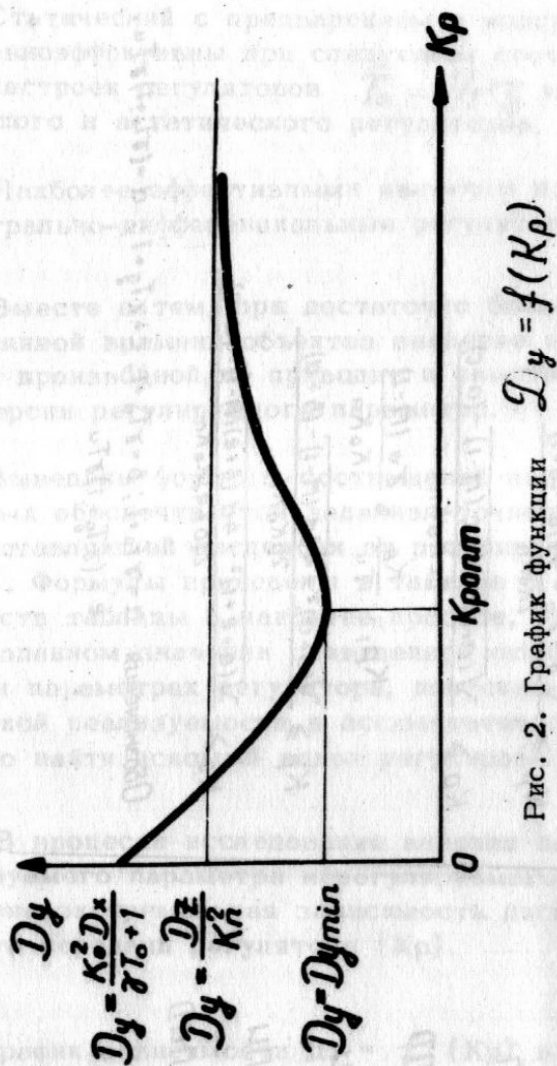


Рис. 2. График функции  $D_y = f(K_p)$

Существование предела  $D_y = f(K_p)$  при  $K_p \rightarrow \infty$  позволяет получить упрощенное условие реализуемости АСС с выбираемым измерительным звеном

$$L\% \leq \frac{\Delta\tau\%}{\Delta n\%} 100\% , \quad (2)$$

где  $L\%$  - зона пропорциональности измерительного звена;

$\Delta\tau\%$  - заданная ошибка регулирования, приведенная ко входу измерительного звена;

$\Delta n\%$  - приведенная погрешность измерительного звена.

Для И-закона регулирования условие реализуемости оказывается в несколько раз более жестким, нежели в случае применения законов, содержащих П-составляющую, т.к. для И-закона

$$\lim_{K_p \rightarrow \infty} D_y = (\delta T_0 + 1) \frac{D_z}{K_n^2}$$

В главе III разработан инженерный метод расчета оптимальных настроек регулятора, реализующего выбранный ранее закон регулирования, в случае учета нерегулируемых возмущений.

Задача отыскания оптимальных настроек эквивалентна задаче поиска минимума функции  $D_y = f(K_p, T_d)$ . Аналитически определить значения оптимальных настроек регулятора не представляется возможным в силу сложности самой функции. Задача решена с использованием средств вычислительной техники (более подробно это изложено в главе У1).

Некоторые результаты главы III вошли составной частью в методику исследования применимости общепромышленных датчиков и приборов автоматического контроля в качестве измерительных звеньев систем, разработанную с участием автора в институте "Пищепромавтоматика".

**1У. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ С АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИЕЙ ВИДА  $R_{xx}(t) = D_x e^{-\gamma|t|} \cos \Omega t$  НА ДИСПЕРСИЮ РЕГУЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА**

В главе 1У результаты, полученные в предыдущей главе, распространены на автоматические стабилизирующие системы, находящиеся под влиянием регулируемого возмущения, содержащего осцилляционную составляющую, и нерегулируемого возмущения.

Получены зависимости, связывающие составляющую дисперсии регулируемого параметра от регулируемого возмущения с параметрами системы и статистическими характеристиками возмущения. Зависимости приведены в таблице 4 ( $\Omega$  - резонансная частота). Не трудно видеть, что если в формулах таблицы 4 принять  $\Omega = 0$ , то из них немедленно получаются формулы таблицы 1.

Исследования зависимостей таблицы 4 для систем, содержащих П- и ПД-регуляторы, показало, что при

$$\Omega \gg \Omega_{1кр} = \left( \gamma + \frac{\kappa+1}{A_m} \right) \sqrt{\frac{D_{умx}}{D_{умz}} - 1}$$

основное внимание необходимо уделить компенсации составляющей дисперсии, порожденной нерегулируемым возмущением. Для решения вопроса реализуемости АСС необходимо в этом случае использовать упрощенное условие реализуемости, полученное в главе III.

Таблица 4

Установившиеся значения ДРП на выходе типовых АСС

$$R_{xx}(t) = D_x e^{-\gamma|t|} \cos \Omega t$$

Тип регулятора	Значение коэффициента			Объект типа аperiodического звена I порядка
	Циклс	A	B	
Статический	$m-1$	$T_0$	0	$D_{умx} = \frac{K_0^2 [A_m \gamma + (\kappa+1)]}{(\kappa+1) \{ [A_m \gamma + (\kappa+1)]^2 + A_m \Omega^2 \}} D_x$
Статический с предвращением	$m-2$	$T_0 + KT_{\phi}$	0	
Астатический	$n-1$	$T_u T_0$	$T_u$	
Широтный	$n-2$	$T_u T_0$	$T_u (\kappa+1)$	$D_{умx} = \frac{K_0^2 T_u^2 D_x (A_n \alpha \gamma + B_n \alpha + \kappa \delta)}{B_n \{ [A_n \alpha \gamma + B_n \alpha + \kappa \delta]^2 + \Omega^2 (A_n \alpha - \kappa)^2 \}} D_x$
Широтный с предвращением	$n-3$	$T_u [T_0 + KT_{\phi}]$	$T_u (\kappa+1)$	

В случае  $\Omega \ll \Omega_{2кр}$  составляющая регулируемого возмущения играет основную роль в формуле для установившегося значения дисперсии регулируемого параметра. Следовательно, необходимо основное внимание уделить выбору достаточно эффективного закона регулирования с помощью рекомендаций главы III.

Для систем, содержащих И-, ПИ- и ПИД-регуляторы, критическое значение резонансной частоты имеет вид

$$\Omega_{2кр} = \gamma \frac{D_{ух}}{D_{уnz} a^2 b^2}$$

Здесь 
$$a^2 = \frac{A_n \delta \Omega + B_n}{A_n \delta^2 + B_n + K}; \quad b^2 = \left( \frac{A_n L - K}{A_n L + B_n \frac{L}{\gamma} + K} \right)^2;$$

$$L = \delta^2 + \Omega^2.$$

Если и в этом случае  $\Omega \gg \Omega_{2кр}$  или  $\Omega \ll \Omega_{2кр}$ , то снова справедливы рассуждения, приведенные выше.

В случаях, когда значения  $\Omega_{2кр}$  близки к  $\Omega$ , принять  $\Omega = 0$  не представляется возможным.

Для этих случаев разработаны рекомендации, основанные на аппроксимации автокорреляционной функции вида  $R_{xx}(t) = D_x e^{-\delta|t|} \cos \Omega t$  экспоненциальной функцией вида  $R_{xx}^*(t) = D_x^* e^{-\delta^*|t|}$ . В работе приведен график функции  $\eta'^2 = f(\eta)$ , с помощью которого просто определяются коэффициенты  $D_x^*$  и  $\delta^*$  по формулам

$$D_x^* = \frac{D_x}{1 - \left( \frac{\eta'}{1 + \eta} \right)^2};$$

$$\delta^* = \eta \eta',$$

где 
$$\eta' = \frac{\Omega}{\delta}, \quad \eta = \frac{\delta^*}{\delta}$$

Приближенные значения  $\eta$  могут быть определены по предлагаемой формуле

$$\eta = \frac{\sqrt{16 + 27\eta'^2} - 1}{3} \quad (4)$$

С возрастанием  $\eta'$  от 0 до  $+\infty$  погрешность определенных по формуле (4) значений  $\eta$  изменяется от 0 до 14,8%.

В результате проведенной аппроксимации появляется возможность рассчитывать АСС требуемой точности, находящиеся под влиянием возмущений с осциллиционной составляющей, в соответствии с методикой, изложенной в III главе.

## У. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ТИПОВЫХ АСС, ВКЛЮЧАЮЩИХ ОБЪЕКТЫ С ЧИСТЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Глава У посвящена исследованию динамической точности и разработке инженерной методики расчета типовых АСС с запаздыванием.

Получены зависимости, связывающие составляющие дисперсии регулируемого параметра от основного и нерегулируемого возмущений с параметрами и статистическими характеристиками возмущений. Зависимости приведены в таблицах 5 и 6.

Установившиеся значения ДРП на выходе типовых АСС

Таблица 5

$$R_{xx}(z) = D_x \epsilon^{-\delta_1/z}$$

Тип регулятора	Значения коэффициентов					Объект операционное звено 1 порядка и звено чистого запаздывания
	А	В	F	T	I	
Статический	$T_0 \tau_0$	$\frac{2T_0}{\tau_0} (k-1)$	$2(k+1)$	0	0	$D_{y_{max}} = \frac{K_0 D_x}{B_m F_m} \cdot \delta (F_m \tau_0^2 + 4) \cdot 4H_m$
Статический с предварением	$(k-k_0) \tau_0$	$\frac{2(T_0 + k_0 \tau_0)}{\tau_0} + \tau_0$	$2(k+1)$	0	0	$D_{y_{max}} = \frac{K_0^2 \tau_0^2 \delta D_x}{(B_n F_n - T_n A_n)} \cdot A_n \delta^2 + B_n \delta^2 \cdot F_n \delta + T_n$
Астатический	$T_0 T_0 \tau_0$	$T_0 (2T_0 + \tau_0^2)$	$2T_0 - k \tau_0$	$2k$	$2k$	
Циклотронный	$T_0 T_0 \tau_0$	$\frac{T_0 [2T_0 - \tau_0^2 (k-1)]}{\tau_0 (k-1)}$	$2T_0 (k+1) - k \tau_0$	$2k$	$2k$	
Циклотронный с предварением	$\frac{T_0 (T_0 - k_0 \tau_0)}{k_0 \tau_0} \tau_0$	$\frac{T_0 [2(T_0 + k_0 \tau_0) - \tau_0^2 (k-1)]}{\tau_0 (k-1)}$	$2T_0 (k+1) - k \tau_0$	$2k$	$2k$	

Установившиеся значения составляющей ДРП, порожденной погрешностью измерительного звена

Таблица 6

$$R_{zz}(z) = D_z \epsilon^{-\delta_1/z}$$

Тип регулятора	Значения коэффициентов					Объект операционное звено 1 порядка и звено чистого запаздывания
	А	В	F	T	I	
Статический	$T_0 \tau_0$	$\frac{2T_0}{\tau_0} (k-1)$	$2(k+1)$	0	0	$D_{y_{max}} = \frac{K^2}{A_m B_m F_m} \cdot \frac{\alpha m}{A_m \tau^2 + B_m T + F_m} \cdot \frac{D_z}{K^2}$
Статический с предварением	$(k-k_0) \tau_0$	$\frac{2(T_0 + k_0 \tau_0)}{\tau_0} + \tau_0$	$2(k+1)$	0	$T_0^2$	$\alpha m = \delta^2 B_m F_m R_m \tau_0^2 \cdot \delta (F_m R_m + A_m) / F_m \tau_0^2 + 4A_m + 4A_m B_m$
Астатический	$T_0 T_0 \tau_0$	$T_0 (2T_0 + \tau_0^2)$	$2T_0 - k \tau_0$	$2k$	0	$D_{y_{max}} = \frac{K^2}{A_n B_n (B_n F_n - A_n T_n)} \cdot A_n \tau_0^2 \cdot \delta \tau_0^2 \cdot \frac{D_z}{K^2} \cdot \frac{D_z}{K^2}$
Циклотронный	$T_0 T_0 \tau_0$	$\frac{T_0 [2T_0 - \tau_0^2 (k-1)]}{\tau_0 (k-1)}$	$2T_0 (k+1) - k \tau_0$	$2k$	$T_0^2$	$\alpha_n \delta^2 (B_n F_n - A_n T_n) / T_n L_n \tau_0^2 \cdot \delta^2 [F_n (F_n L_n L_n \tau_0^2 + A_n (L_n + R_n \tau_0^2))] + A_n^2 (4R_n + \tau_0^2) + 4A_n^2 B_n + \delta_1 [T_n^2 F_n L_n \tau_0^2 + A_n (4L_n + R_n \tau_0^2)] + A_n B_n [T_n (4R_n + \tau_0^2) + 4B_n] + 4A_n (B_n F_n - T_n A_n)$
Циклотронный с предварением	$\frac{T_0 (T_0 - k_0 \tau_0)}{k_0 \tau_0} \tau_0$	$\frac{T_0 [2(T_0 + k_0 \tau_0) - \tau_0^2 (k-1)]}{\tau_0 (k-1)}$	$2T_0 (k+1) - k \tau_0$	$2k$	$T_0 (T_0 - 2T_0)$	

Звено чистого запаздывания аппроксимировано членом первого порядка ряда Пада функции  $e^{-j\omega\tau_0}$  ( $\tau_0$  - чистое запаздывание).

Показано, что при аппроксимации звена чистого запаздывания членом первого порядка (по сравнению со вторым порядком), относительная погрешность определения дисперсии по формулам таблиц 5 и 6 не превышает 7%.

Строгое математическое исследование зависимостей таблицы 5 подтвердило, что составляющая дисперсии регулируемого параметра от основного возмущения в этом случае экстремально зависит от коэффициента передачи регулятора и имеет минимальное значение при оптимальных настройках регулятора. График функции  $Dy = \Psi(Kp)$  приведен на рис. 3 (кривая -2).

Получены простые формулы для определения приближенных значений оптимальных настроек регуляторов типовых АСС, находящихся под влиянием основного возмущения с автокорреляционной функцией вида экспоненциальной функции (таблица 7). Относительная погрешность определения настроек по формулам таблицы 7 для часто встречающихся случаев систем не превышает 20%. Условия физической реализуемости АСС накладывают на временные настройки регуляторов ограничение в виде  $T_u \gg \frac{T_0}{2}$ . Значения оптимальных настроек регуляторов, рассчитанные по формулам таблицы 7, близки (при тех же временных настройках регуляторов) к значениям, обеспечивающим минимальную квадратичную площадь под кривой переходного процесса при детерминированных (типа "скачка") возмущениях.

Таблица 7

Формулы для определения оптимальных настроек типовых регуляторов

$$[R_{xx}(t) = D_x e^{-\delta|t|}]$$

Тип регулятора	Объект регулирования широкополосный периодический элемент I порядка и звеном чистого запаздывания
Статический	$Kp = \frac{T_0}{K_0 K_n T_0}$
Статический с предварением	$Kp = \frac{T_0 + T_3}{K_0 K_n (T_0 - 2T_3)}$ $T_3 \ll \frac{T_0}{2}$
Узгодный	$Kp = \frac{2T_0 (2T_0 - T_0) - (2T_0 + T_0)T_0}{2K_0 K_n (2T_0 - T_0)T_0}$ $T_u \gg \frac{T_0}{2}$
Узгодный с предварением	$Kp = \frac{4T_0 (T_0 + T_3) - T_0(4T_0 + T_0)}{2K_0 K_n [T_0(2T_0 - T_0) - 4T_0 T_3]}$

Приведен анализ эффективности регулирования различными типовыми регуляторами. Анализ показал, что при центрированных возмущениях пропорционально-дифференциальный регулятор эффективнее пропорционально-интегрально-дифференциального на величину  $K \cdot \frac{T_0(K+1)}{2T_0 + T_0}$  и пропорционально-интегрально-дифференциального на величину

$$K \cdot \frac{T_0}{2T_0} \left( 1 + \frac{2T_0 - K T_0}{2T_0 + T_0} \right).$$

Построение АСС на базе И-регулятора нецелесообразно, так как дисперсия регулируемого параметра на выходе системы с И-регулятором выше дисперсии на выходе разомкнутой системы.

Строгое математическое исследование полного выражения для дисперсии регулируемого параметра показало, что ошибка регулирования возрастает с увеличением запаздывания. С ростом составляющей, порожденной нерегулируемым возмущением, минимальное значение дисперсии возрастает, а оптимальные настройки регулятора уменьшаются (кривая 1 на рис. 3).

Разработан инженерный метод расчета оптимальных настроек регулятора, реализующего выбранный закон регулирования, в случае учета нерегулируемого возмущения.

И в этом случае задача отыскания оптимальных настроек регулятора эквивалентна задаче поиска минимума функции  $D_y = \Psi(K_p, T_g)$ . Задача решена с использованием средств вычислительной техники в силу сложности функции.

В приложении 1 диссертации приведена разработанная автором универсальная программа для ЭЦВМ "Минск-22", которая по заданным параметрам АСС и воздействий ( $K_0; T_0; \tau_0; \delta; \delta_1; D_x; D_z$ ) и заданному закону регулирования (П, ПД, ПИ, ПИД) отыски-

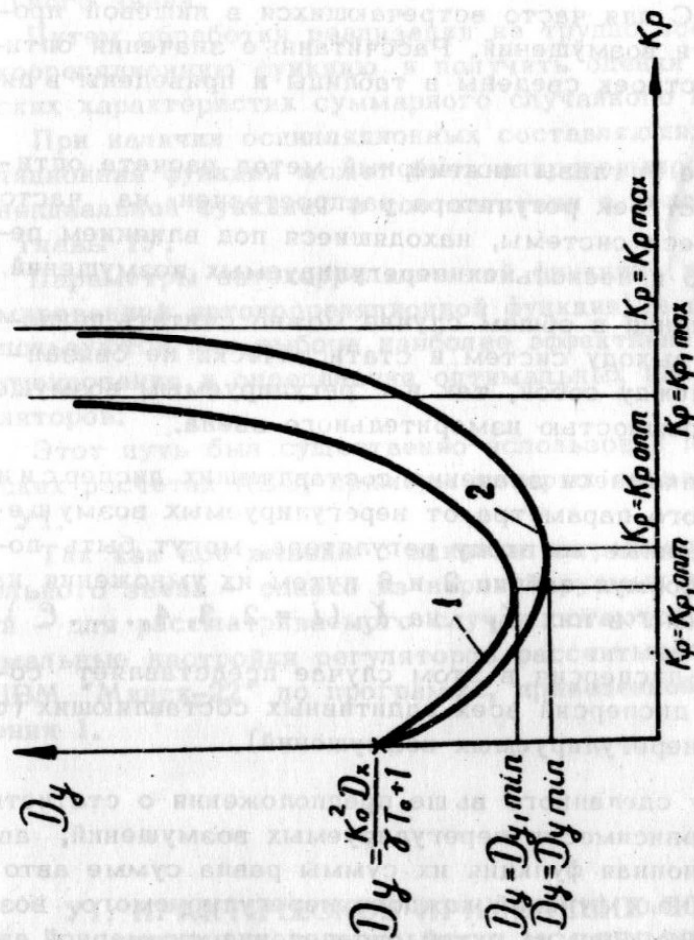


Рис. 3. Графики функции  $D_y = \Psi(K_p)$

вает оптимальные настройки регулятора систем с запаздыванием и без запаздывания. По программе вычислительным центром института "Пищепромавтоматика" рассчитаны значения оптимальных настроек регуляторов типовых АСС для часто встречающихся в пищевой промышленности возмущений. Рассчитанные значения оптимальных настроек сведены в таблицы и приведены в диссертации.

В конце У главы инженерный метод расчета оптимальных настроек регулятора распространен на часто встречающиеся системы, находящиеся под влиянием регулируемого и нескольких нерегулируемых возмущений.

Возмущения в общем случае можно считать приложенными к выходу систем и статистически не связанными как между собой, так и с регулируемым возмущением и погрешностью измерительного звена.

Установившиеся значения составляющих дисперсии регулируемого параметра от нерегулируемых возмущений, приведенные ко входу регулятора, могут быть получены из формул таблиц 2 и 6 путем их умножения на  $K_n^2$  и замены в них  $\chi_1$  на  $\chi_i$  ( $i = 2, 3, 4, \dots, \ell$ ).

Общая дисперсия в этом случае представляет собой сумму дисперсий всех аддитивных составляющих (основного и нерегулируемых возмущений).

В силу сделанного выше предположения о статистической независимости нерегулируемых возмущений, автокорреляционная функция их суммы равна сумме автокорреляционных функций каждого нерегулируемого возмущения. Это один из путей определения суммарной автокорреляционной функции нерегулируемых возмущений.

В качестве другого пути ее определения может быть предложен прием, основанный на стабилизации основного возмущения. В этом случае в процессе эксперимента в реальных условиях на выходе измерительного звена раз-

рабатываемой системы записывается реализация суммарного случайного процесса, порождаемого всеми нерегулируемыми воздействиями, включая погрешность измерительного звена.

Путем обработки реализации не трудно построить автокорреляционную функцию и получить оценки статистических характеристик суммарного случайного процесса.

При наличии осцилляционных составляющих автокорреляционная функция может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией в соответствии с рекомендациями главы IV.

Параметры автокорреляционной функции (или аппроксимированной автокорреляционной функции) в дальнейшем используются для выбора наиболее эффективного закона регулирования и определения оптимальных настроек регуляторов.

Этот путь был существенно использован при практических расчетах АСС, примеры которых приведены в главе У1.

Так как все выводы о влиянии погрешности измерительного звена - одного из нерегулируемых возмущений - для рассматриваемого случая остаются в силе, оптимальные настройки регуляторов рассчитывались на ЭЦВМ "Минск-22" по программе, приведенной в приложении 1.

## У1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В главе У1 приведены некоторые примеры использования основных результатов исследования при практических разработках АСС для пищевой промышленности.



регулятора, рассчитанные по формулам табл. 7 и полученные в процессе моделирования, хорошо согласуются друг с другом.

Разработанная система в качестве локального контура внедрена на сушилке Шебекинского химического комбината.

б) Расчет АСС ленточной сушилки типа КСА-80 для сушки круп

Сушилка как объект регулирования исследовалась статистическими методами. В результате исследования определены динамические характеристики основных каналов, основные возмущения, установлена связь возмущений с основными параметрами, характеризующими режим сушки, получены оценки статистических характеристик возмущений.

В процессе исследования установлено, что случайные колебания давления (расхода) пара, поступающего в калориферы I и II лент, существенно влияют на температуру  $Y_1(t)$  и  $Y_2(t)$  над I и II лентами и, следовательно, на основной параметр качества - влажность готового продукта.

Для компенсации возмущений разработаны автоматические стабилизирующие системы температуры воздуха над I и II лентами сушилки. Системы разрабатывались с учетом того, что на регулируемый параметр существенно влияют низкочастотные нерегулируемые возмущения - влажность продукта на лентах  $\bar{X}_1(t)$  и  $\bar{X}_2(t)$ .

Оптимальные настройки регуляторов предварительно определялись численным методом по формулам таблиц 5, 6 и 7, а затем уточнялись путем моделирования АСС на АВМ и расчета по программе приложения 1 на ЭЦВМ "Минск-22".

Реализации регулируемых и нерегулируемых возмущений, записанные в процессе эксперимента, набирались на блоках нелинейностей и подавались в процессе моделирования на вход и выход систем, соответственно.

Результаты расчета и моделирования приведены в табл. 8. Анализ данных табл. 8 показывает, что сходимость результатов хорошая.

В настоящее время разработанными АСС оснащено свыше 10 сушилок. Экономический эффект за счет приближения номинала влажности готового продукта к границе, рекомендуемой ГОСТ'ом, и экономии энергоносителей на одной сушилке составляет 17,5 тыс. руб. в год. Срок окупаемости капитальных затрат - 0,1 года.

в) Расчет АСС температурно-влажностного режима хлебопекарной печи ФТЛ-2

Метод разработки автоматической стабилизирующей системы температурно-влажностного режима печи ФТЛ-2 аналогичен методу разработки систем сушилки типа КСА-80. Поэтому перейдем прямо к изложению расчета системы.

В данном случае основными параметрами, влияющими на качественные показатели хлебобулочных изделий, являются температура и влажность паровоздушной среды в пекарной камере. На эти параметры существенно влияют случайные колебания давления (расхода) пара, подаваемого в зону увлажнения пекарной камеры - регулируемое возмущение  $X_1(t)$ , и случайные колебания нагрузки печи - нерегулируемое возмущение  $\bar{X}_1(t)$ .

Оптимальные настройки регулятора определены численным методом по формулам табл. 5, 6 и 7, уточнены путем моделирования системы на АВМ и расчета по программе приложения 1 на ЭЦВМ "Минск-22".

Результаты расчета и моделирования приведены в табл. 8.

Как видно из табл. 8, значения оптимальных настроек регулятора, рассчитанные на ЭЦВМ и полученные в процессе моделирования, хорошо согласуются друг с другом.

Разработанной АСС температурно-влажностного режима в пекарной камере в настоящее время оснащено свыше 15 печей ФТЛ-2.

Экономический эффект, получаемый за счет улучшения качества продукции, экономии сырья и энергоносителей, составляет на одну печь свыше 5,0 тыс. руб. в год.

Срок окупаемости капитальных затрат - 1 год.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Изучен и классифицирован большой экспериментальный материал, накопленный Всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом "Пищепроматоматика" в процессе автоматизации технологических процессов пищевой промышленности. Это позволяет установить, что:

- наиболее распространены в пищевой промышленности одномерные непрерывные линейные автоматические стабилизирующие системы;

- регуляторы систем - общепромышленные регуляторы, реализующие типовые законы регулирования;

- объекты регулирования в подавляющем большинстве случаев, с приемлемой для практических расчетов точностью, аппроксимированы апериодическим звеном 1 порядка либо апериодическим звеном 1 порядка и звеном чистого запаздывания;

- основные (регулируемые) внешние возмущающие воздействия, приложенные на входе систем, представляют собой нормальные стационарные случайные процессы, автокорреляционные функции которых с допустимой точностью могут быть аппроксимированы экспоненциальными или экспоненциально-косинусными функциями;

- системы подвержены, наряду с регулируемыми возмущениями, влиянию одного или нескольких внутренних и внешних нерегулируемых возмущений, приложенных к различным точкам систем. Нерегулируемые возмущения представляют собой также случайные процессы, аналогичные случайным процессам основных возмущений.

2. Получены и проверены на аналоговых вычислительных машинах зависимости, связывающие дисперсию регулируемого параметра (принятую оценку динамической точности) с параметрами указанных систем и статистическими характеристиками внутренних и внешних возмущений.

3. Теоретически исследовано влияние типовых законов регулирования, параметров систем, характеристик внешних и внутренних возмущений на дисперсию регулируемого параметра.

4. В процессе исследования установлено и экспериментально подтверждено при моделировании типовых АСС:

- влияние типовых законов регулирования, параметров систем, характеристик внешних и внутренних возмущений на дисперсию регулируемого параметра весьма существенно;

- с повышением уровня регулирования составляющая дисперсии регулируемого параметра от регулируемого возмущения уменьшается, а составляющие, порождаемые нерегулируемыми возмущениями, возрастают;

- в системах без запаздывания, подверженных влиянию регулируемого и нерегулируемых возмущений, дисперсия регулируемого параметра экстремально зависит от коэффициента передачи регулятора и имеет минимальное значение при оптимальных настройках регулятора;

- в системах с запаздыванием составляющая дисперсии регулируемого параметра от регулируемого возмущения экстремально зависит от коэффициента передачи регулятора и имеет минимальное значение при оптимальных настройках регулятора. С увеличением влияния нерегулируемых возмущений минимальное значение дисперсии регулируемого параметра возрастает, а оптимальные настройки регулятора уменьшаются;

- в системах, объекты которых имеют большую постоянную времени, введение в закон регулирования про-

изводной практически не приводит к уменьшению дисперсии регулируемого параметра.

5. Получены простые формулы для определения приближенных значений оптимальных настроек регуляторов в системах автоматической стабилизации с запаздыванием, находящихся под влиянием регулируемых случайных возмущений с автокорреляционными функциями вида экспоненциальной функции.

6. Показано, что значения оптимальных настроек, рассчитанные по указанным формулам, близки (при тех же временных настройках регуляторов) к значениям оптимальных настроек, обеспечивающих минимальную квадратичную площадь под кривой переходного процесса при детерминированных возмущениях типа "скачка".

7. Разработаны и экспериментально проверены на аналоговых вычислительных машинах:

- инженерные рекомендации по выбору наиболее эффективных и вместе с тем возможно простых законов регулирования;

- упрощенное условие реализуемости проектируемых систем с выбираемыми измерительными звеньями (общепромышленными датчиками и приборами автоматического контроля);

- инструкция пользования и программа расчета на ЭЦВМ "Минск-22" оптимальных настроек регуляторов в случае систем с запаздыванием и без запаздывания.

8. Рассчитаны на ЭЦВМ "Минск-22" и приведены в виде таблиц значения оптимальных настроек регуляторов типовых автоматических стабилизирующих систем, подверженных влиянию случайных регулируемых и нерегулируемых возмущений, часто встречающихся в пищевой промышленности.

9. Результаты работы распространены на системы, находящиеся под влиянием возмущений, представляющих собой случайные процессы с осцилляцией и с белым спектром в полосе частот.

10. Разработанные метод расчета, рекомендации, программа и формулы для определения оптимальных настроек регуляторов применены при расчете нескольких конкретных автоматических стабилизирующих систем.

Рассчитанные значения оптимальных настроек регуляторов близки к полученным при моделировании и практически совпадают с уточненными в процессе промышленной эксплуатации указанных систем.

11. Результаты исследования могут найти применение при разработке автоматических стабилизирующих систем технологических процессов инженерно-техническими работниками научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций и предприятий пищевой промышленности.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Измерение расхода и дозирование вязких масс кондитерского производства. М., журнал "Хлебопекарная и кондитерская промышленность", № 2, 1967. (Соавторы Сидоров А.С. и Радченко В.В.).

2. Автоматизация контроля щелочности и кислотности некоторых сред свеклосахарного производства. М., журнал "Сахарная промышленность", № 7, 1967. (Соавторы Сидоров А.С. и Радченко В.В.).

3. Контроль плотности и расхода известкового молока. М., журнал "Сахарная промышленность", № 5, 1967. (Соавторы Сидоров А.С. и Радченко В.В.).

4. Анализ зависимости дисперсии регулируемых параметров в типовых САР. Труды и рефераты Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Пищепромавтоматика", вып. 3, Одесса, 1968. (Соавтор Шапко И.И.).

5. К вопросу оптимального управления типовыми регуляторами при случайных возмущениях. Труды и рефераты Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-

конструкторского института "Пищепромавтоматика", вып. 4, Одесса, 1969. (Соавтор Шапко И.И.).

6. Некоторые вопросы исследования применимости обще промышленных средств автоматизации в пищевой промышленности. Труды и рефераты Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Пищепромавтоматика", вып. 4. Одесса, 1969. (Соавторы Радченко В.В., Сидоров А.С., Тульчинский Ю.В.).

По вопросам, рассматриваемым в диссертации, автором сделан доклад на Одесском отделении семинара "Кибернетика и автоматическое управление" АН УССР в октябре месяце 1968 г.

