

Автор ер.

Д 64

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ДОНСКОЙ Дмитрий Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ  
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ЗАМЕСОМ ТЕСТА

05.13.07 – автоматическое управление и регули-  
рование, управление технологическими 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 на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент МИРОНОВ И.С.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки  
и техники УССР, доктор  
технических наук,  
профессор ВАРЛАМОВ М.Д.

кандидат технических наук,  
доцент САМОНОВ Ф.А.

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности (ВНИИХП)

Защита состоится "23" февраля 1979 г. в 14<sup>30</sup> час.  
на заседании специализированного совета К 068.35.01 (специальность 05.13.07) Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова. Адрес: 270039, Одесса-39, ул. Свердлова, 112, ОТИШ им. М.В. Ломоносова.

института.

ОНАХТ 27.07.11  
Исследование динамик



v013278

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. XXV съезд КПСС поставил перед хлебопекарной промышленностью ряд задач, связанных с расширением производственной базы, вооружением предприятий передовой техникой и технологией, ростом производительности труда, увеличением выработки продукции. В решении этих задач большая роль принадлежит автоматическим системам регулирования (АСР) – крупнейшему резерву технического прогресса и улучшения качества хлебобулочных изделий. Существующий же уровень автоматизации хлебопечения, в частности замеса теста, не отвечает возросшим современным требованиям дальнейшего повышения эффективности производства.

В отечественной практике вопросы исследования и разработки систем оптимального автоматического управления тестоприготовительными агрегатами и установками непрерывного действия не получили должного решения. Это приводит к необходимости и целесообразности оснащения тестомесильных машин (ТМ) эффективными АСР, при создании которых должен использоваться весь арсенал современных достижений теории и практики автоматического управления.

Опыт химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслей промышленности свидетельствует о том, что использование оптимальных алгоритмов управления в целом дает значительный экономический эффект.

Таким образом, разработка оптимальных алгоритмов управления замесом теста как одного из основных технологических участков хлебопекарного производства является актуальной задачей, решение которой имеет научное и практическое значение. В результате обеспечивается резкое повышение эффективности автоматического управления тестоприготовительным отделением, снижение внутрипроизводственных потерь, повышение производительности труда, существенное улучшение технико-экономических показателей технологической линии производства хлебобулочных изделий.

Цель работы. На основе изучения динамики непрерывного процесса замеса теста (НПЗТ) как объекта управления и исследования особенностей функционирования общепромышленных АСР в условиях случайных возмущений разработать оптимальные алгоритмы управления процессом на базе вероятностно-статистического подхода.

Одесский технологический  
институт пищевой промышленности  
им. М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

с. 6. 13278

V 013278

Перечисл 1988

Общая методика работы основана на использовании современных методов исследования, оптимального управления, статистической динамики, математической статистики, дисперсионного и корреляционного анализа, теории подобия; при выполнении исследований широко использованы аналоговые и цифровые средства моделирования процессов и систем управления. Теоретические исследования сочетаются с обширными экспериментальными исследованиями в производственных условиях технологического оборудования и систем его автоматического управления.

Объект исследования - технологический процесс замеса теста, реализуемый в тестоприготовительных агрегатах и установках непрерывного действия.

Научная новизна результатов исследования. Впервые предложен, исследован и разработан способ автоматического управления замесом теста и структура оптимальной системы регулирования, основанные на введении в алгоритм управления статистических параметров процесса и формировании на их основе упреждающих (на базе прогноза) управляющих воздействий. Разработан алгоритм имитационного моделирования методом статистических испытаний Монте Карло, позволивший синтезировать оптимальную структуру и параметры АСР, обеспечивающие минимум дисперсии регулируемой технологической величины. Исследован адаптивный прогнозирующий фильтр процесса замеса, реализующий метод экспоненциального сглаживания. Разработана обобщенная математическая модель динамики НПЗТ. Проведены всесторонние исследования качества функционирования общепромышленных АСР, подверженных случайным возмущениям.

Новизна разработанного способа и реализующего его устройства подтверждены авторским свидетельством и положительным решением на изобретение.

Практическое значение результатов работы. Полученные критериальные соотношения и уравнения обобщенной математической модели динамики процесса позволяют в практических расчетах определить требования к параметрам конструкции и режима работы тестоприготовительного оборудования для достижения заданного технологического результата с учетом требований автоматического управления процессом.

Предложенный принципиально новый способ управления замесом

теста и разработанные на его основе алгоритмы управления позволяют значительно повысить точность управления процессом и существенно улучшить технико-экономические показатели участка тестоприготовления. Результаты работы легли в основу проекта автоматизации тестоприготовительного агрегата непрерывного действия и внедряются в настоящее время на Московском хлебозаводе № 6.

Апробация работы. Проверка положений, разработанных в диссертации, проводилась в ходе плановых научно-исследовательских работ. Экспериментальные исследования, производственные испытания и внедрения общепромышленных и оптимальной АСР проводились на хлебозаводах № 2 и 4 (Одесса), на хлебозаводе № 2 (Кишинев), на опытном хлебозаводе ВНИИХПа (Москва).

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на секции "Кибернетика и автоматическое управление" научного совета по проблеме "Кибернетика" АН УССР (Одесса, 1976, 1977 гг.), на республиканском семинаре "Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности" (Киев, 1977 г.), на научно-технических конференциях ОТИПП им. М.В. Ломоносова (1974, 1977 гг.), на совещании специалистов Упрхлебпрома МПП РСФСР по вопросам ускорения темпов научно-технического прогресса в хлебопекарной отрасли на тему "Автоматизация основных технологических процессов в хлебопечении" (Тольятти, 1978 г.), на объединенном заседании кафедр автоматизации пищевых производств, технологического оборудования пищевых производств, прикладной математики и вычислительной техники, технологии хлебопекарных и кондитерских производств ОТИПП им. М.В. Ломоносова (Одесса, 1978 г.), на заседании кафедры автоматизации пищевых производств МТИПП (Москва, 1978 г.).

Публикация результатов. Результаты выполненных исследований изложены и опубликованы в 8 работах и 2 авторских свидетельствах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, изложена на 148 страницах машинописного текста, включает 97 рисунков, 145 таблиц. Библиография содержит 228 наименований.

## 2. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе дана краткая характеристика современного процесса за-

меса теста. Определены технологические особенности, роль, место и значение процесса в производстве хлеба. Отмечается, что определяющими особенностями процесса являются большое количество разветвляющихся и соединяющихся материальных потоков продуктов, многомерность, нелинейность зависимостей между параметрами, а также высокая степень их неопределенности, случайности изменения.

В качестве теоретической базы исследования в диссертации используется метод системного анализа. Руководствуясь принципами системного подхода, определены основные направления совершенствования исследований по автоматизации непрерывного замеса теста. В работе дано параметрическое описание процесса тестоприготовления как объекта системного анализа. Классифицированы и описаны промежуточные, возмущающие, управляющие и управляемые параметры. Показано, что влажность теста является важнейшим и обязательным параметром в оценке его технологических свойств. Влажность теста жестко регламентирована выходом готовой продукции, должна быть стабильной и обеспечивать стандартную влажность хлеба. Автоматическое измерение и регулирование влажности теста является необходимым условием автоматизации тестоприготовления и всего технологического процесса производства хлеба.

Современной тенденцией повышения точности и стабильности замеса в мировой практике хлебопечения является разработка и внедрение АСР, осуществляющих дозирование ингредиентов в функции сигнала отклонения влажности теста от ее заданной величины.

В диссертации проанализирован накопленный в СССР и за рубежом опыт автоматизации тестоприготовительных агрегатов и установок непрерывного действия, а также аппаратов перемешивания, применяемых в других производствах.

Результаты анализа показывают, что проведенные исследования почти не затрагивают таких важных вопросов, как построение обобщенной математической модели динамики, количественная оценка точности ведения процесса замеса как стохастического объекта, исследование случайного характера возмущающих воздействий и их статистическое описание, исследование и разработка оптимальных алгоритмов управления на основе вероятностно-статистического подхода.

В этой связи необходимо дать ответ на ряд вопросов, которые

формулируются как задачи исследования. К ним относятся:

- а) теоретические и экспериментальные исследования процесса с целью разработки обобщенной математической модели динамики НПЗТ;
- б) статистическое описание процесса и действующих возмущающих факторов с целью получения исходных данных для статистического синтеза оптимальной АСР;
- в) исследование особенностей функционирования общепромышленных систем управления ТМ в условиях случайных возмущений;
- г) разработка и исследование оптимальных алгоритмов управления замесом теста на основе вероятностно-статистического подхода.

### 3. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЗАМЕСА ТЕСТА

В качестве математического аппарата, позволяющего разработать обобщенную модель динамики, предлагаются методы теории подобия, позволяющие экстраполировать полученные в экспериментах данные, обработанные в соответствующей критериальной форме, на технологическое оборудование с подобными процессами. Такая модель позволит описать взаимосвязь динамических характеристик с определяющими их факторами и научно обоснованно отразить изменения динамических свойств при изменении условий работы ТМ без необходимости проведения исследований натурального образца.

В диссертационной работе были проведены обширные исследования наиболее распространенных ТМ типа X-12, X-12 повышенной производительности, X-26, ХТП, ротационных. Показано, что движение теста при перемешивании носит ламинарный характер (критерий  $Re_{\omega} \leq 10 + 20$ ), закономерности которого аналогичны закономерностям перемешивания вязко-пластичных сред. В указанном диапазоне изменения  $Re_{\omega}$  как для смесителей неньютоновских жидкостей, так и для указанных ТМ основное критериальное уравнение движения перемешиваемой системы имеет вид:

$$K_N = C Re_{\omega}^{-1} \prod_{i=1}^k \Gamma_i^{a_i} \quad (1)$$

В работе описана гидродинамика замеса теста, обосновано применение однопараметрической диффузионной и аппроксимирующей ее ячеечной модели. Система дифференциальных уравнений последней в безразмерной форме записи имеет вид:

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{dy_i}{d\theta} = y_{i-1} - y_i \quad (2)$$

Для начальных условий  $y_0 = \text{const} = 1$  и  $y_i(0) = 0$  при  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  решение системы (2) при ступенчатом изменении влажности на входе ТМ равно

$$y(1, \theta) = y_m(\theta) = 1 - \left[ 1 + \frac{m\theta}{1!} + \frac{(m\theta)^2}{2!} + \dots + \frac{(m\theta)^{m-1}}{(m-1)!} \right] e^{-m\theta} \quad (3)$$

Идентификация ТМ в соответствии с имеющимися рекомендациями производилась путем сопоставления безразмерных сглаженных экспериментальных кривых разгона и переходных процессов, отвечающих ячеечной модели вида (3). Последние были вычислены и построены на ЭЦВМ "Минск-32" для  $m = 1 + 20$  и  $\theta = 0 + 3,5$  и непосредственно нанесены на экспериментальные кривые разгона ТМ.

Обработка результатов экспериментов привела к соотношениям

$$m = 12,93 Re_{\psi}^{-0,84} \left( \frac{H}{d_M} \right) \left( \frac{\ell}{L} \right)^{1,54}; \quad (4)$$

$$Pe = 20,47 Re_{\psi}^{-0,84} \left( \frac{H}{d_M} \right)^{1,19} \left( \frac{\ell}{L} \right)^{1,54}; \quad (5)$$

$$T_{\theta} = m^{-0,43}; \quad (6)$$

$$\tau_{\theta} = 1 - m^{-0,43}. \quad (7)$$

Вопрос перехода от относительного времени процесса к реальному был решен с помощью примененного в работе критерия времени пребывания  $K\bar{\tau}$ . Для его определения были обработаны экспериментальные данные по аналогии с зависимостями (4), (5) и получено критериальное уравнение вида:

$$K\bar{\tau} = 126 Re_{\psi}^{-1,73} \left( \frac{H}{d_M} \right)^{-0,27} \left( \frac{\ell}{L} \right). \quad (8)$$

Тогда на основе зависимостей

$$T_0 = T_{\theta} \bar{\tau}, \quad \tau_z = \tau_{\theta} \bar{\tau}; \quad (9)$$

$$T_{\theta} = \left[ 12,93 Re_{\psi}^{-0,84} \left( \frac{H}{d_M} \right) \left( \frac{\ell}{L} \right)^{1,54} \right]^{-0,43}; \quad (10)$$

$$\bar{\tau} = 126 Re_{\psi}^{-1,73} \left( \frac{H}{d_M} \right)^{-0,27} \left( \frac{\ell}{L} \right) \frac{\rho d_M^2}{\mu}; \quad (11)$$

$$\tau_{\theta} = 1 - T_{\theta}, \quad (12)$$

можно перейти к реальным значениям динамических параметров. Подставляя (10), (11), (12) соответственно в (9) после преобразований, получаем в конечной форме уравнения, связывающие  $T_0$  и  $\tau_z$  с конструктивными характеристиками ТМ, показателями режима работы и

физико-механическими свойствами теста

$$T_0 = 42 H^{-0,7} d_M^{-0,04} n^{-1,37} \rho^{-0,37} \mu^{0,37} \left(\frac{\ell}{L}\right)^{0,34}; \quad (13)$$

$$\tau_z = 126 \rho^{-0,73} \mu^{0,73} n^{-1,73} d_M^{-1,19} H^{-0,27} \left(\frac{\ell}{L}\right) - T_0. \quad (14)$$

Относительная погрешность при определении  $T_0$ ,  $\tau_z$  согласно уравнений (13), (14) с доверительной вероятностью 0,95 не превышает  $5 \pm 10\%$ .

#### 4. ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА

В диссертации показано, что замес является стохастическим процессом, а значения консистенции влажности теста представляют собой квазистационарные случайные последовательности. Эмпирические распределения консистенции  $K_T(t)$  в конце зоны смешивания ингредиентов, в начале ТМ и влажности теста  $V_T(t)$  на выходе подчиняются нормальному закону. Степень связи между  $K_T(t)$  и  $V_T(t)$  оценивалась с помощью коэффициента корреляции, который приблизительно составил  $r_{VK} \approx -0,5$ . Полученное значение  $|r_{VK}| < 1$  указывает на то, что отдельное текущее изменение  $K_T(t)$  не является представительной информацией о  $V_T(t)$ , подтверждая тем самым стохастическую природу замеса теста в ТМ.

По полученным статистическим данным на ЭЦВМ М-220М была определена автокорреляционная функция и спектральная плотность процесса. Установлено, что НЦТ с достаточной на практике точностью описывается экспоненциальной автокорреляционной функцией вида

$$R_{ww}(\tau) = D_w e^{-\beta|\tau|} = 0,84 e^{-0,00533|\tau|} \quad (15)$$

и имеет дробно-рациональную спектральную плотность

$$S_{ww}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ww}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \frac{0,00448}{(0,00533)^2 + \omega^2}. \quad (16)$$

Результаты экспериментов по определению реальных параметров статистической модели позволили записать для двух различных условий замеса следующие аналитические выражения для дисперсий, среднеквадратических отклонений и условного математического ожидания

$$\begin{aligned} D_{V1} &= 27 D_{K1} + 0,14, & D_{V2} &= 25 D_{K2} + 0,02; \\ \sigma_{V1} &= 4,4 \sigma_{K1} + 0,21, & \sigma_{V2} &= 4,8 \sigma_{K2} + 0,04; \\ M[V_T | K_{Ti}] &= \frac{r_{VK} \sigma_V}{\sigma_K} K_{Ti} = -3,6 K_{Ti}. \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнения (17) указывают на тесную взаимосвязь между аналогичными статистическими параметрами процесса в начале и на выходе ТМ.

В диссертации раскрыта вероятностная природа действующих в объекте компенсируемого  $X_w(t)$  и некомпенсируемого  $Z_w(t)$  возмущений. Показано, что их автокорреляционные функции аппроксимируются выражениями вида:

$$R_{X_w}(\tau) = D_X e^{-\beta_x |\tau|} = 0,0001528 e^{-0,00633 |\tau|}; \quad (18)$$

$$R_{Z_w}(\tau) = D_Z e^{-\beta_z |\tau|} = 0,11834 e^{-0,001133 |\tau|}. \quad (19)$$

Результаты статистических исследований позволили сформулировать следующие основные свойства и особенности процесса. Случайные изменения  $K_T(t)$  и  $V_T(t)$  подчиняются нормальному закону распределения и могут быть представлены аналогичными статистическими параметрами. Увеличение (уменьшение) дисперсии, среднеквадратического отклонения математического ожидания  $K_T(t)$  в начале аппарата приводит к увеличению (уменьшению) соответствующих статистических характеристик  $V_T(t)$  на выходе ТМ.

Состояние замеса необходимо оценивать не по отдельным случайным текущим отклонениям влажности теста, а по их статистическим характеристикам и в первую очередь по математическому ожиданию (МО) и дисперсии. Это позволяет объективно оценивать нарушение процесса замеса от технологической нормы, существенно уменьшить влияние априорной неопределенности и удовлетворительно прогнозировать тенденцию изменения процесса.

Оптимальное управление замесом теста должно основываться на введении в алгоритм управления статистических параметров процесса и идти по пути повышения упреждающих действий.

#### 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ АСР ПРОЦЕССОМ ЗАМЕСА, ПОДВЕРЖЕННЫХ СЛУЧАЙНЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

В диссертации проведены всесторонние исследования динамической точности общепромышленных систем с учетом параметров ТМ как объектов управления на основе известных статистических характеристик возмущающих воздействий. Показано, что для объекта вида

$$\frac{k_0}{T_0 p + 1} e^{-p\tau_z} \quad \text{при наличии компенсируемого } X_w(t) \quad \text{и}$$

некомпенсируемого  $Z_w(t)$  возмущений наиболее приемлемым является метод, предложенный и разработанный Ф.А. Самоновым<sup>1</sup>. Этот метод обладает достаточной универсальностью и позволяет учитывать специфические особенности объектов автоматизации пищевой промышленности.

Исследования типовых АСР согласно принятой методике проводились на АВМ МН-17, ЭЦВМ "Наири-К", а также в производственных условиях эксплуатации. Сравнительный анализ функционирования общепромышленных систем управления показывает следующее.

Динамическая точность ( $D_w$  мин.) экстремально зависит от коэффициента передачи регулятора для любого закона управления. При этом с увеличением  $\tau_z/T_0$  диапазон изменения значений  $k_p$  близких к оптимальному значению  $k_{p, \text{opt}}$  существенно сужается. Поэтому в области больших отношений  $\tau_z/T_0$  усложняется настройка регулятора, что делает его менее надежным в эксплуатации.

В широком диапазоне изменения  $\tau_z/T_0 = 0,125 + 1,25$  при центрированных возмущениях вида (18), (19) ПД и П законы управления оказываются наиболее эффективными. С увеличением  $\tau_z$  эффективность управления статическим с предварением регулятором выше, чем при использовании П, ПИ, ПИД законов управления. Однако введение в закон управления производной не приводит к существенному уменьшению  $D_w$  мин. в случае ТМ с большей постоянной времени  $T_0$ . С увеличением  $\tau_z$ ,  $D_w$  мин также увеличивается, а оптимальное значение  $k_{p, \text{opt}}$  (с учетом ограничений на временные настройки согласно требований устойчивости  $T_d = 0,05 \tau_z$ ,  $T_u = 5 \tau_z$ ) уменьшается.

В диссертации проведены исследования влияния  $X_w(t)$ ,  $Z_w(t)$  на  $D_w$  мин при оптимальных настройках регулятора. Показано, что с увеличением  $\tau_z$  дисперсия  $D_{X_w}$ , порожденная  $X_w(t)$ , резко возрастает, а  $D_{Z_w}$ , порожденная  $Z_w(t)$ , наоборот, уменьшается, хотя и не так быстро. Увеличение  $T_0$  при любых  $\tau_z$  увеличивает  $D_{Z_w}$ . При  $\tau_z \leq 60$  с помеха  $Z_w(t)$  в цепи обратной связи значительно снижает качество функционирования системы. Последнее обстоятельство повышает требования к точности датчика влаж-

---

1 Самонов Ф.А. Исследование точности и разработка инженерного метода расчета автоматических стабилизирующих систем пищевой промышленности. Канд. диссертация. Одесса, 1969.

мости. При  $\tau_z > 90$  с основное влияние на динамическую точность оказывает погрешность дозирующей аппаратуры и  $D_{w. мин}$  главным образом определяется возмущением  $X_w(t)$ .

В результате всесторонних исследований общепромышленных АСР в диссертации получены достаточно простые для практического использования эмпирические соотношения. Некоторые из них для ПИ и ПИД законов управления имеют вид:

ПИ-регулятор

ПИД-регулятор

$$D_{w. мин} = 0,1224 + 0,0077 \frac{1}{k_{p. опт}}, \quad D_{w. мин} = 0,0857 + 0,0088 \frac{1}{k_{p. опт}};$$

$$D_{w. мин} = 0,1254 + 0,6006 \tau_z / T_0, \quad D_{w. мин} = 0,1186 + 0,5552 \tau_z / T_0;$$

$$k_{p. опт} = 0,0125 (\tau_z / T_0)^{-1}, \quad k_{p. опт} = 0,0033 + 0,0129 (\tau_z / T_0)^{-1}. \quad (20)$$

Зависимости (20) с учетом уравнений (13), (14) позволяет оценить в установившемся режиме функционирования АСР  $D_{w. мин}$  и  $k_{p. опт}$  от параметров конструкции ТМ, режима их работы и физико-механических характеристик замешиваемого теста.

## 6. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МОНТЕ КАРЛО

Основываясь на положениях стохастической теории регулирования и идеи теоремы разделения, оптимальная стратегия управления НПЗТ должна состоять из двух частей: оптимального прогнозирующего фильтра (ПФ), оценивающего с упреждением изменения  $\bar{W}_T(t)$  и регулятора, определяющего сигнал управления  $u(t)$ , который требуется для того, чтобы сделать ожидаемый прогнозный сигнал равным технологически заданной влажности теста. При этом ошибка управления будет минимальной и теоретически равной ошибке прогнозирования, определяемой долей чисто случайной составляющей процесса.

В диссертации выполнены исследования ПФ как составного элемента оптимальной АСР. Прогнозными величинами являлись значения МО влажности теста, рассчитанные на интервале времени усреднения, равном  $T_{ср} = \tau_{макс}$  и  $T_{ср} \leq \frac{\tau_{макс}}{2}$ , где  $\tau_{макс}$  - максимальное время спада корреляционной функции  $R_{ww}(\tau)$ .

В качестве близкого к оптимальному методу прогнозирования в работе обосновано применение метода экспоненциального сглаживания (ЭС) по Р. Брауну. Для верификации прогнозов использовали константную, линейную и квадратичную модели ЭС. Согласно метода ЭС прогноз

осуществляется по формуле Тейлора

$$\hat{W}_{t+\hat{\tau}} = \bar{W}_t + \frac{d\bar{W}_t}{dt} \hat{\tau} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{d^2\bar{W}_t}{dt^2} (\hat{\tau})^2 + \dots + \frac{1}{K!} \cdot \frac{d^K\bar{W}_t}{dt^K} (\hat{\tau})^K \quad (21)$$

с помощью экспоненциально сглаженных величин различных порядков, которые рассчитываются по следующей рекуррентной зависимости:

$$S_t^{[K]}(\bar{W}) = \alpha S_t^{[K-1]}(\bar{W}) + (1-\alpha) S_{t-1}^{[K]}(\bar{W}) \quad (22)$$

Для выбора оптимальной структуры ПФ и его параметров моделирование проводилось на ЭЦВМ М-220М. Анализ результатов прогнозирования показывает следующее. Ошибка прогнозирования  $\hat{\sigma}_{пр}$  при  $\hat{\tau} = 1$  для всех моделей ЭС существенно меньше, чем  $\hat{\sigma}_{пр}$  при больших  $\hat{\tau}$ .

Для повышения оперативности управления при использовании ПФ в контуре регулирования исходят из требования минимизации  $N$  при сохранении той же точности прогноза. В связи с этим предпочтение имеют квадратичная и линейная модели ЭС, для которых  $N_{opt} = 2$ . Для константной модели в зависимости от дисперсии ряда  $N_{opt} = 4 \div 6$ .

В различных моделях ЭС обнаруживаются характерные диапазоны изменения оптимальных значений  $\alpha_{opt}$  при  $\hat{\tau}_{opt} = 1$ . Так, для константной модели  $\alpha_{opt} = 0,65 \div 0,90$ , для линейной  $\alpha_{opt} = 0,4 \div 0,6$  и для квадратичной  $\alpha_{opt} = 0,2 \div 0,4$ .

Установлена целесообразность использования при прогнозировании ряда  $MO$  влажности теста, определяемые на пятиминутном и ниже временном интервале.

При синтезе оптимальной АСР в качестве структуры ПФ выбраны линейная и константная модели ЭС со следующими параметрами:

$$N = 2 \div 5, \quad \hat{\tau} = 1 \quad \text{и} \quad \alpha = 0,4 \div 0,95.$$

Главным результатом проведенных исследований является то, что оптимальный ПФ позволяет получать прогнозы со значительно меньшими ошибками  $\hat{\sigma}_{пр}$ , чем значения  $\hat{\sigma}_р$  для тех же рядов  $MO$ . Это подтверждает то, что управление НПЗТ по текущим значениям  $MO$  влажности теста с использованием ПФ в цепи обратной связи позволит существенно повысить эффективность и качество функционирования АСР.

В диссертации показано, что оптимальная АСР по своей структуре должна состоять из следующих функциональных элементов: датчика влажности теста в потоке, статистического анализатора, прогнозирующего фильтра, блока сравнения, задатчика и регулятора (рис.1).

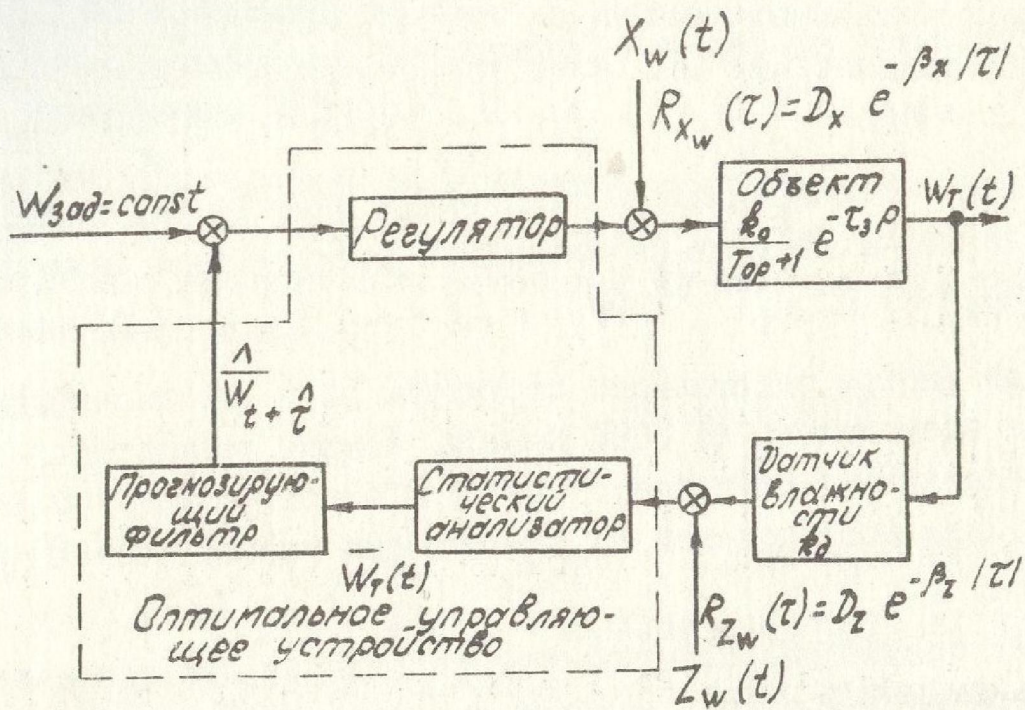


Рис. 1. Структурная схема оптимальной АСР

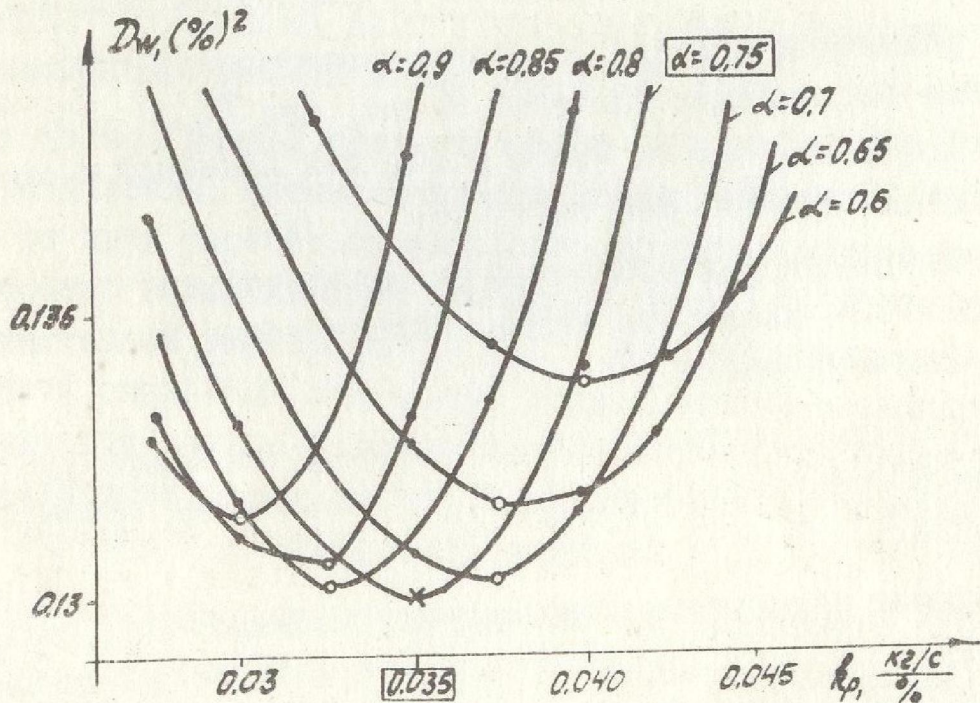


Рис. 2. Изменения локальных оптимумов  $D_w = f(\alpha, k_p)$  для ПМО алгоритма управления:  $\circ$  - значение экстремума;  $\times$  - минимум локального оптимума

Принцип действия системы заключается в следующем. Датчик непрерывно измеряет значение параметра, зависящее от влажности теста. Статистический анализатор оценивает текущее значение МО влажности за определенный интервал  $T_{cp}$ . Формируемая таким образом последовательность значений МО представляет предьсторию процесса  $N$  и объективно отражает тенденцию его изменения в результате действующих в объекте возмущений  $X_w(t)$  и  $Z_w(t)$ . ПФ, реализующий метод ЭС, определяет будущее прогнозное значение МО на последующий интервал времени  $T_{cp}$ . Выходной сигнал фильтра сравнивается с величиной задания и в случае их рассогласования формируется сигнал-ошибка  $\mathcal{E}_o(t)$  на регулятор. Регулятор вырабатывает упреждающее на время  $T_{cp}$  пропорционально  $\mathcal{E}_o(t)$  управляющее воздействие  $U(t)$ , изменяющее подачу компонентов теста.

Таким образом, АСР позволяет осуществлять управление НПЗТ на основе вероятностного прогноза на интервал времени  $T_{cp}$  ближайшей тенденции изменения МО влажности теста.

В работе подробно изложен разработанный алгоритм имитационного моделирования по методу статистических испытаний Монте Карло, позволяющий с достаточной на практике точностью исследовать стохастический процесс замеса и систему управления им.

Синтез оптимальной системы управления заключается в обеспечении условия  $D_w = f(K, T_{cp}, N, \alpha, k_p) = \text{оптимум (минимум)}$ . Параметр  $K$  определяет вид алгоритма управления. Для ПФМК алгоритма управления ( $K = 1$ ) АСР реализует прогнозирующий фильтр математического ожидания влажности по константной модели ЭС. Для ПФМЛ алгоритма управления ( $K = 2$ ) система регулирования осуществляет прогноз по линейной модели ЭС. При управлении только по математическому ожиданию влажности без блока прогнозирования АСР реализует ПМО алгоритм управления ( $K = 0$ ).

На ЭЦВМ М-220М и АВМ МН-17 осуществлен многовариантный анализ эффективности оптимальной АСР при различных ее параметрах и алгоритмах функционирования в широком диапазоне изменения динамических характеристик объекта и действующих возмущений.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать ряд выводов весьма существенных для практической реализации системы.

В широком диапазоне изменения  $k_p = (0,01 + 0,05) \frac{\text{кг/с}}{\%}$  и  $T_{cp} = (60 + 300) \text{ с}$  для любых  $\alpha$  длина предыстории  $N$  оказывает достаточно сильное влияние на дисперсию процесса. Для АСР, реализующей ПФМЛ алгоритм управления, функция  $D_w = f(N)$  принимает минимальные значения при  $N = 2$  для всех  $T_{cp}$ . В случае ПФМК алгоритма управления минимум функции  $D_w = f(N)$  при  $T_{cp} \leq 120 \text{ с}$  соответствует  $N = 3, 4$ . С увеличением  $T_{cp} > 120 \text{ с}$  функция  $D_w = f(N)$  имеет минимум и при  $N = 2$ . Исходя из задач управления процессом замеса и особенностей функционирования тестоприготовительного оборудования рекомендовано в качестве оптимального параметра выбрать  $N_{opt} = 2$ , что для АСР с ПФМЛ алгоритмом управления обеспечивает абсолютный минимум локального оптимума  $D_w = f(N)$ .

В диапазоне изменения  $T_{cp} = (60 + 300) \text{ с}$  минимальное значение локального оптимума  $D_w = f(T_{cp})$  при  $N_{opt} = 2$  соответствует АСР, реализующей ПФМЛ алгоритм управления при  $T_{cp.opt} = 120 \text{ с}$ .

Для определения оптимальных значений  $\alpha$  и  $k_p$  были проведены исследования соответствующих локальных оптимумов  $D_w = f(\alpha)$  и  $D_w = f(k_p)$  для рекомендованных ранее  $N_{opt} = 2$  и  $T_{cp.opt} = 120 \text{ с}$ . Установлено, что отдельному фиксированному  $\alpha$  соответствует определенное значение  $k_p$ , при котором  $D_w = f(k_p)$  принимает экстремальное значение. Характер изменения указанных экстремальных значений и соответствующих им сочетаний  $\alpha$  и  $k_p$  изображен на рис. 2. Как следует из материалов рисунка для АСР с ПФМЛ алгоритмом управления, функция  $D_w = f(\alpha, k_p)$  достигает минимума при  $\alpha_{opt} = 0,75$  и  $k_{p.opt} = 0,035 \frac{\text{кг/с}}{\%}$ .

В диссертации проведены разносторонние исследования влияния на эффективность функционирования АСР алгоритмов управления вида ПФМК, ПФМЛ, ПМО при оптимальном сочетании параметров настройки. Показано, что минимум дисперсии влажности теста  $D_w \text{ мин}$  соответствует ПФМЛ алгоритму управления. Реализация АСР на базе алгоритмов вида ПФМК и ПМО менее эффективна. Экстремальные значения  $D_w$  для ПФМК и ПМО алгоритмов управления существенно не отличаются и, например, при  $\tau_z/T_0 = 0,33$  и  $k_0 = 117 \frac{\%}{\text{кг/с}}$  составляют  $D_{w.ПФМК} = 0,1523(\%)^2$ ,  $D_{w.ПМО} = 0,1551(\%)^2$ .

Таким образом, в результате проведенного синтеза в качестве оптимального целесообразно принять вариант АСР с прогнозирующим

фильтром математического ожидания влажности теста по линейной модели ЭС (алгоритм вида ПФМЛ) и с параметрами:  $T_{ср.онт} = 120$  с,  $N_{онт} = 2$ ,  $\alpha_{онт} = 0,75$ ,  $k_{р.онт} = 0,035 \frac{\text{кг/с}}{\%}$ . Минимум дисперсии влажности теста при этом составит  $D_{w.мин} = 0,13 (\%)^2$ . Однако полученные результаты характерны для  $k_0 = 117 \frac{\text{кг/с}}{\%}$ ,  $\tau_z/T_0 = 0,33$ ,  $D_x = 0,0001528 (\frac{\text{кг}}{\text{с}})^2$  и  $D_z = 0,11834 (\%)^2$ .

Для практической реализации оптимальной АСР, реализующей ПФМЛ алгоритм управления с параметрами  $T_{ср.онт} = 120$  с,  $N_{онт} = 2$  в диссертации были проведены исследования качества процесса управления в условиях изменяющихся динамических характеристик НПЗТ и статистических параметров действующих случайных возмущений. Полученные при этом зависимости позволяют довольно просто рассчитать оптимальные настройки АСР в следующем диапазоне изменения параметров объекта и возмущений:  $k_0 = (42 \div 150) \frac{\text{кг/с}}{\%}$ ;  $\tau_z/T_0 = 0,125 \div 1,0$ ;  $D_x = (8,35 \div 16,7) \cdot 10^{-5} (\frac{\text{кг}}{\text{с}})^2$ ;  $D_z = (0,08 - 0,14) (\%)^2$ .

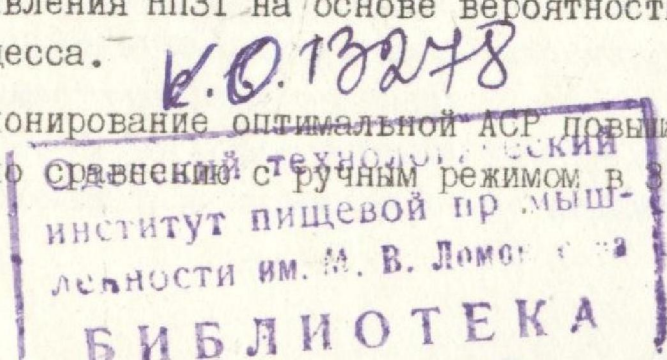
В заключительной части диссертации изложены практические результаты автоматического управления тестоприготовительными агрегатами различных конструкций (ХТУ-Д, Л4-ХАГ, РЗ-ХТН), проведенные автором на Одесском хлебозаводе № 4, Кишиневском хлебозаводе № 2 и опытном хлебозаводе ВНИИХПа в г. Москве.

Производственные испытания оптимальной системы управления выполнены на Одесском хлебозаводе № 4 на тестомесильной установке непрерывного действия, включающей ТМ типа Х-12 повышенной производительности. Приготовление хлеба паланицы украинской осуществлялось по технологической схеме на соленой жидкой опаре. Контрольные измерения влажности проводились по показаниям вторичного прибора ДСР-1, входящего в комплект консистометра АКТ-5, а также с помощью лабораторного теххимического метода К.Н. Чиживой.

Сравнительные результаты исследования общепромышленных и оптимальной АСР отражены на рис. 3.

Производственные испытания подтвердили работоспособность оптимальной системы регулирования и перспективность реализации алгоритмов управления НПЗТ на основе вероятностно-статистических параметров процесса.

Функционирование оптимальной АСР повышает точность управления процессом по сравнению с ручным режимом в 3 ÷ 3,5 раза, а по сравнению с ручным режимом в 3 ÷ 3,5 раза, а по сравнению с ручным режимом в 3 ÷ 3,5 раза, а по сравнению с ручным режимом в 3 ÷ 3,5 раза.



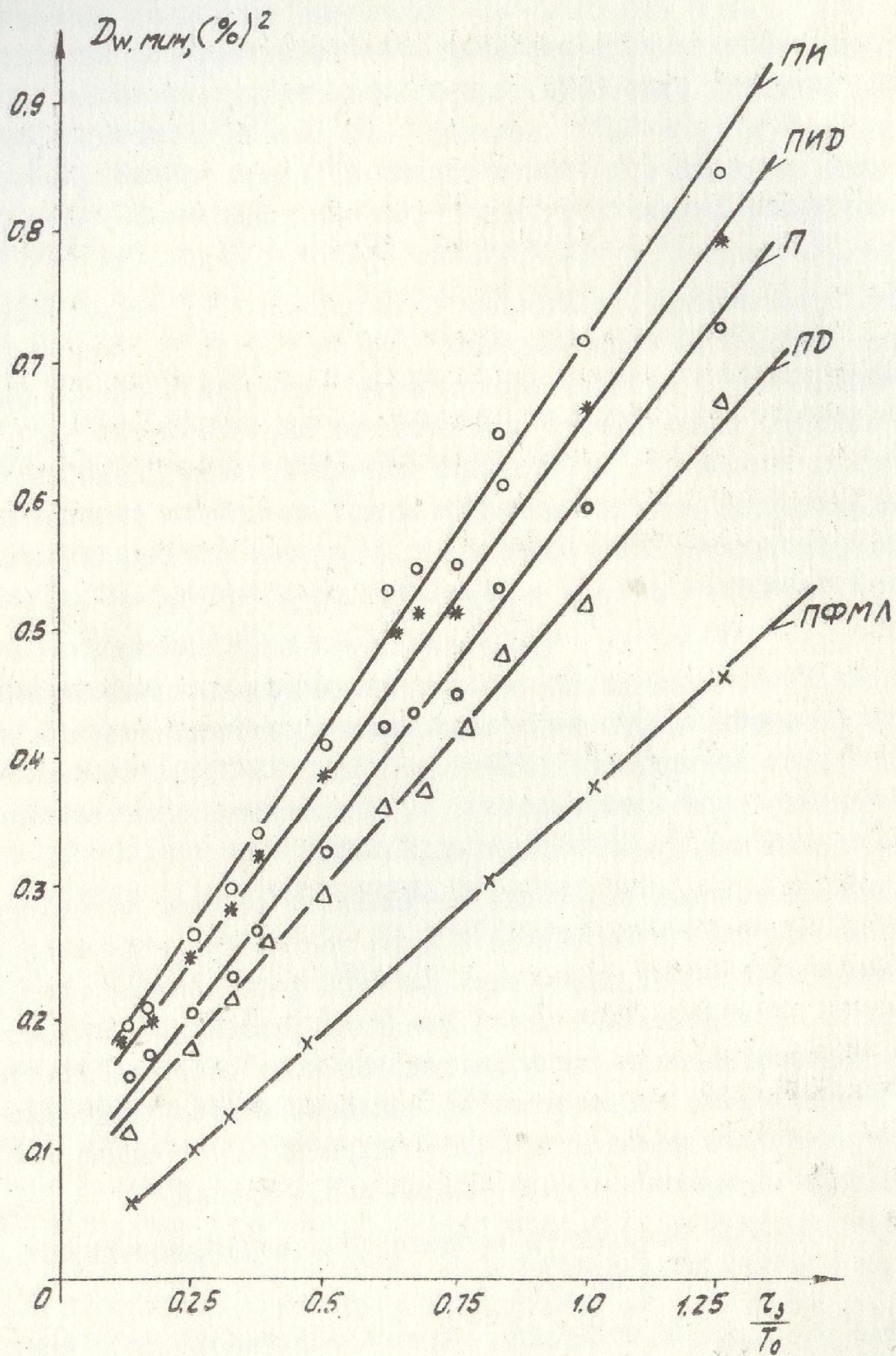


Рис.3. Графики зависимости  $D_{w.min} = f\left(\frac{z_3}{T_0}\right)$  для типовых и оптимального алгоритмов управления

нению с типовыми системами управления в 2+ 2,2 раза.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа состояния автоматизации тестоприготовительного оборудования и аппаратов перемешивания, применяемых в других производствах, поставлена и решалась задача синтеза оптимальных алгоритмов управления замесом теста.

2. Разработана обобщенная математическая модель динамики процесса. Модель позволяет, не прибегая к исследованию натурального образца, еще на стадии проектирования обосновать требования к параметрам конструкции и режима работы тестомесильных машин для достижения заданного технологического эффекта с учетом требований автоматического управления процессом.

3. Проведен вероятностно-статистический анализ процесса. Установлено по критерию согласия А.Н. Колмогорова, что изменения влажности теста в начале и на выходе тестомесильной машины подчиняются нормальному закону распределения. Замес теста описывается экспоненциальной корреляционной функцией и имеет дробно-рациональную спектральную плотность.

4. Проведены разносторонние исследования влияния на динамическую точность общепромышленных АСР типовых законов управления, параметров тестомесильных машин как объектов автоматизации, компенсируемых и некомпенсируемых случайных возмущений. Показано, что применение общепромышленных систем регулирования может быть эффективно лишь при малых значениях  $\tilde{v}_z/T_0$  и  $k_0$  для стационарных случайных компенсируемых возмущений с небольшой скоростью спада автокорреляционной функции и отсутствием помех в цепи обратной связи.

5. Обоснована структура оптимальной АСР, которая должна включать статистический анализатор технологического процесса, оптимальный прогнозирующий фильтр и линейную обратную связь (пропорциональный регулятор) в контуре управления по математическому ожиданию влажности теста.

6. Разработан алгоритм имитационного моделирования процесса и системы управления с помощью метода статистических испытаний Монте Карло. Осуществлен многовариантный анализ функционирования оптимальной АСР. Установлены закономерности изменения эффективности системы управления в зависимости от ее параметров, алгоритмов управле-

ния, динамических характеристик тестомесильных машин и статистических параметров, действующих в объекте возмущений.

7. Разработан, теоретически и практически обоснован, защищен двумя авторскими свидетельствами принципиально новый способ управления процессом замеса на основе вероятностного прогноза ближайшей тенденции изменения математического ожидания влажности теста.

8. По критерию минимума дисперсии влажности теста рекомендован в качестве оптимального ПФМД алгоритм управления с параметрами  $N_{opt} = 2$ ,  $T_{ep.opt} = 120$  с. Это позволило повысить эффективность стабилизации влажности теста по сравнению с наиболее распространенными общепромышленными системами регулирования для больших  $\bar{c}_z/T_0 = 0,75$  с  $\mathcal{D} = 0,58 \pm 0,95$  до  $\mathcal{D} = 1,94$ , т.е. в  $3,34 \pm 2,04$  раза, а для малых  $\bar{c}_z/T_0 = 0,25$  с  $\mathcal{D} = 1,33 \pm 2,02$  до  $\mathcal{D} = 5,14$ , т.е. в  $3,86 \pm 2,54$  раза.

9. Разработанная оптимальная АСР внедряется в настоящее время на Московском хлебозаводе № 6 по заказу Упрхлеба МШ РСФСР. Годовой экономический эффект по сравнению с общепромышленными системами управления для типового хлебозавода средней мощности составляет 14000 руб. при сроке окупаемости затрат менее, чем за полгода. Повышение производительности труда по заводу увеличится на 1,65%.

Содержание диссертации отражают следующие работы:

1. Лейчик В.Я., Донской Д.М., Зуйвиченко В.С. Разработка модели динамики непрерывного замеса теста. Труды ин-та "Пищепромавтоматика". Одесса, 1974, вып. 12-13, с. 59-66.

2. А.с. 575074 (СССР). Способ автоматического управления технологическим процессом в массообменных аппаратах, в частности, в тестомесильных машинах/Од.технол. ин-т пищ. пром-сти им. М.В. Ломоносова; Авт. изобрет. Д.М. Донской, И.С. Миронов, - Заявл. 15.09.75, № 2176872/28-13; Опубл. в Б.И., 1977, № 34.МКИ А21М1/00 УДК 621.92 (088.8).

3. Миронов И.С., Донской Д.М. Оптимизация технологического процесса методом статистического синтеза системы управления. Тез. респ. семинара "Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности". Киев, 1977, с. 16-17.

4. Донской Д.М., Лейчик В.Я., Прокопенко Н.Ф. Автоматизация

контроля и управления процессами тестоприготовления в хлебопекарном производстве. М., ЦНИИТЭИпищепром, 1977, 31 с.

5. Донской Д.М., Миронов И.С. Вероятностно-статистический подход к вопросу стабилизации влажности теста. - Науч.техн.реф.сб.: Хлебопекарная и макаронная промышленность. М., ЦНИИТЭИпищепром, 1977, № 3, с.21-23.

6. Донской Д.М., Миронов И.С. Статистическая идентификация и управление замесом теста. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1977, № 2, с. 105-107.

7. Донской Д.М., Миронов И.С., Лейчик В.Я. Исследование макрокинетики перемешивания теста с целью автоматизации тестоприготовления. - Изв. вузов. Пищевая технология, 1977, № 4, с.118-121.

8. Донской Д.М., Миронов И.С., Лейчик В.Я. Зависимость динамических параметров тестомесильных машин от влажности теста. - Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1977, № 7, с. 29-31.

9. Донской Д.М., Миронов И.С. Исследование работы тестомесильных машин. - Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1978, № 1, с. 27-28.

10. А.с. по заявке № 2523093/28-13 (СССР)/Од.технол.ин-т пищ. пром-сти им. М.В. Ломоносова; Авт. изобрет. Д.М. Донской, И.С.Миронов. - Заявл. 29.08.77. МКИ А21С1/00 УДК 621.921 (088.8).

#### Принятые обозначения

$Re_{\zeta}$  - критерий Рейнольдса;  $K_M$  - критерий мощности;  $C$  - коэффициент;  $\Gamma_i$  - симплексы геометрического подобия;  $a_i$  - показатели степени;  $m$  - параметр ячеечной модели (число ячеек);  $y = \frac{\Delta W_T}{\Delta W_{T. макс}}$  - относительное приращение влажности теста;  $W_T$  - влажность теста, %;  $\theta = \frac{t}{\bar{t}}$  - относительное время;  $t$  - время, с;  $\bar{t}$  - среднее время пребывания частиц теста в объеме машины, с;  $Pe$  - критерий Пекла;  $H$  - высота заполнения машины тестом, м;  $d_M$  - диаметр месильного органа, м;  $l$  - координата установки датчика влажности теста по длине машины, м;  $L$  - длина тестомесильной машины, м;  $T_0$  - постоянная времени объекта, с;  $\tau_z$  - время запаздывания объекта;  $T_{\theta}$  - относительная постоянная времени;  $\tau_{\theta}$  - относительное запаздывание;  $\rho$  - плотность теста, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - пластическая вязкость, н.с/м<sup>2</sup>;  $K_T(t)$  - консистен-

ция теста;  $W_T(t)$  - влажность теста на выходе машины, %;  $D_W$  - дисперсия влажности теста,  $(\%)^2$ ;  $\beta, \beta_x, \beta_z$  - скорости спада автокорреляционных функций,  $c^{-1}$ ;  $\tau$  - время корреляции, с;  $D_x, D_z$  - дисперсии компенсируемого и некомпенсируемого возмущений;  $k_0$  - коэффициент передачи объекта,  $\frac{\%}{кг/с}$ ;  $k_g$  - коэффициент передачи датчика;  $T_u$  - время изодрома, с;  $T_g$  - время предварения, с;  $k_p$  - коэффициент передачи регулятора,  $\frac{кг/с}{\%}$ ;  $\bar{W}_T(t)$  - математическое ожидание влажности и его прогнозное значение, %;  $\hat{t}$  - шаг прогнозирования;  $\mathcal{L}$  - коэффициент сглаживания;  $N$  - длина предыстории процесса;  $\sigma_p$  - среднеквадратическое отклонение прогнозируемого ряда;  $V_{VK}$  - коэффициент корреляции прогнозируемого ряда;  $T_{cp}$  - интервал времени усреднения при оценке  $\bar{W}_T(t)$ , с.  $n$  - скорость вращения месильного органа,  $\frac{об}{с}$ ;  $\omega$  - частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $D_v, D_k, \sigma_v, \sigma_k$  - дисперсия и среднеквадратическое отклонение соответственно  $V_T(t)$  и  $K_T(t)$ ;  $M[V_T | K_{T_i}]$  - условное математическое ожидание  $V_T(t)$ .