

Двтор еер,
Л 83

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ЛУЗИН
ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
СИСТЕМ С РАЗРЫВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
БЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07
Автоматическое управление технологическими процессами
(пищевой промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ОДЕССА — 1975

Авторефер
Л 83

Министерство высшего и среднего специального образования
У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

ЛУЗИН Игорь Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
СИСТЕМ С РАЗРЫВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
БЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.13.07

Автоматическое управление технологическими процессами
(пищевой промышленности)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

012501

Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М.В. Ломоносова

Б И Б Л И О Т Е К А

Одесса - 1975

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент В.А. Долгозвяг.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Н.М. Чумаков

кандидат технических наук, доцент В.Ф. Ломакин

Ведущее предприятие - Одесское управление
"Свеклосахаротреста"
Минпищепрома УССР.

Автореферат разослан "10" 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, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 270039, г. Одесса-39, Свердлова, 112, ОТИП им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
ОТИП им. М.В. Ломоносова

К.Т.Н.

Л.А. Запорожец

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность работы. Для расширения области применения простых и надежных релейных автоматических систем регулирования (АСР) необходима разработка инженерных методик их расчета, учитывающих реальные свойства объекта, регулятора и возмущающих воздействий. В настоящее время вычислительная техника делает возможным такой всесторонний анализ систем и их обоснованный выбор.

Создание простых систем с переменной структурой (СПС) позволит шире использовать их в пищевой промышленности.

Цель работы заключается в исследовании и разработке методик инженерного расчета наиболее простых систем с разрывным управлением - релейных и СПС без использования дифференциаторов.

Научная новизна работы заключается в исследовании релейной АСР при совместном учете неидеальностей объекта и регулятора, а также особенностей системы, подверженной влиянию возмущающих воздействий; рассмотрен один из вариантов СПС без дифференцирующих устройств.

Практическая ценность работы состоит в разработке методик и программ расчета на ЭЦМ релейных АСР, что позволит упростить их проектирование и расширить сферу применения в промышленности.

Экономический эффект от использования результатов работы достигается за счет ускорения проектирования АСР, расширения области применения простых, надежных и более дешевых релейных АСР. Ориентировочная экономия для пищевой промышленности составит около 20 тыс. руб. в год.

Экономический эффект от применения СПС достигается за счет повышения точности регулирования.

Структура диссертационной работы. Работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложения, включающего в себя методики и программы расчета на ЭЦВМ релейной АСР.

Директивами XXIV съезда КПСС предусматривается дальнейшее увеличение производства продукции пищевой промышленности при улучшении ее качества и повышении производительности труда на предприятиях отрасли.

Поставленная задача может быть решена путем интенсификации технологических процессов и их автоматизации. Поэтому планами развития пищевой промышленности предусматривается создание АСУТП и широкая автоматизация отдельных процессов и аппаратов. Будут разрабатываться новые автоматические системы регулирования (АСР) и совершенствоваться существующие системы. Очевидно, что эффективность их работы будет зависеть от учета особенностей объектов регулирования, надежности, простоты и удобства эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость наиболее полного использования положительных свойств существующих и новых принципов управления.

Технологические процессы пищевой промышленности по влиянию отклонения регулируемого параметра от заданного значения можно разделить на несколько характерных групп. Так для некоторых процессов важны суммарные (интегральные) или средние значения технологического параметра (например, температура при стерилизации по методу стерилизующего эффекта, крепость спирта, отбираемого в большие емкости и т.п.). В другой группе процессов отклонение регулируемого параметра от оптимальной величины ухудшает качество продукта или увеличивает энергозатраты (процессы разваривания, экстракции масла и т.п.). Наконец, имеются процессы, в которых выход параметра за заданную границу приводит к порче продукта или нарушению нормального хода процесса (например, перегрев зерна, пригар продукта и т.п.). Очевидно, что это приводит к различным требованиям к точности регулиро-

вания, надежности АСР и т.д. Так для процессов первой и частично второй групп требования к динамической точности регулирования могут быть сравнительно жесткими и допустимо использование простых регуляторов. Для третьей группы процессов становятся важными динамическая точность и надежность.

Известно, что такими положительными свойствами, как простота и надежность, обладают системы с релейным управлением. В последние годы интенсивно разрабатываются такие системы с разрывным управлением, как системы с переменной структурой, обладающие высокими динамическими показателями.

В пищевой промышленности представляется необходимым использовать положительные качества таких систем при их возможном упрощении.

Данная работа связана с исследованием свойств наиболее простых систем с разрывным управлением — без дифференцирующих устройств.

К настоящему времени разработаны точные и приближенные методы расчета релейных систем и достаточно подробно исследованы их отдельные свойства. Для двухпозиционных регуляторов имеются инженерные методики расчета. Однако исследования проведены для систем с идеализированными характеристиками реле и объектов при типовых возмущающих воздействиях. Менее изучены свойства систем с постоянной скоростью сервомеханизма и не определены условия, при которых такие системы при ограничении перемещения исполнительного органа могут рассматриваться как двухпозиционные.

Многие объекты пищевой промышленности имеют запаздывание, что в релейных системах приводит к автоколебаниям. Представляет практический интерес исследование особенностей режимов работы таких систем при гармонических и случайных возмущающих воздействиях.

Для некоторых процессов тепло- и массообмена характерна зависимость постоянной времени от знака управляющего воздействия. В автоколебательных системах это приводит к смещению среднего значения регулируемой величины. Отсутствие методик всестороннего анализа работы релейных АСР приводит к довольно ограниченному использованию их в пищевой промышленности (около 20% разработанных систем).

Поэтому возможность учета неидеальностей реле, запаздывания, зависимости постоянной времени от знака управления и других особенностей реальных промышленных систем позволит выявить нежелательные явления и оценить применимость релейной АСР в конкретных условиях. Это, в свою очередь, приведет к более обоснованному выбору регуляторов и расширению сферы применения релейных АСР.

За последние 10-15 лет в теории систем с переменной структурой получены фундаментальные результаты для СПС с использованием производных и реальными дифференцирующими устройствами. Однако исследования возможности создания скользящего режима в СПС без применения дифференцирующих устройств было уделено мало внимания. Вместе с тем, для разработки более простых и помехозащищенных систем исследование этого вопроса представляется важным.

Таким образом, целью работы является всестороннее исследование свойств таких систем с разрывным управлением без дифференциаторов, как релейные системы и СПС, и разработка методик их расчета. Поэтому в работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать особенности систем с кусочно-постоянным разрывным управлением (релейных) применительно к объектам пищевой промышленности, в частности:

а) рассмотреть работу системы с постоянной скоростью сервомеханизма в автономном режиме с учетом неидеальностей реле, запаздывания, зависимости постоянной времени объекта от знака управления и ограничения перемещения исполнительного органа;

б) исследовать чувствительность системы к изменению ее параметров;

в) рассмотреть особенности работы автоколебательной системы, подверженной влиянию гармонических и случайных воздействий;

г) исследовать чувствительность системы при возмущающих воздействиях (ВВ) к изменению ее параметров и параметров ВВ.

2. Проверить полученные аналитические зависимости на АВМ, разработать методики и программы расчета на ЭЦВМ релейной АСР в автономном режиме и при влиянии ВВ.

3. Исследовать особенности СПС без дифференцирующих устройств и разработать методику их расчета, в частности:

а) рассмотреть возможность создания режима скольжения в системе при свободном движении, разработать методику ее расчета и выявить влияние отдельных параметров на работу системы;

б) оценить качество регулирования в переходном и установившемся режимах при свободном движении;

в) исследовать возможные периодические режимы;

г) рассмотреть работу системы при вынужденном движении и найти методы улучшения качества регулирования.

4. Выяснить возможность практического использования полученных результатов путем их проверки на экспериментальной установке и на промышленных объектах.

Содержание работы

Исследование автономной релейной АСР с учетом запаздывания, зависимости постоянной времени от знака управления и неидеальностей реле

Исследования, проведенные в институте ВНПО "Пищепроматоматика" при разработке АСР для различных подотраслей пищевой промышленности, показывают, что объекты пищевой промышленности в большинстве случаев с достаточной для практических расчетов точностью могут быть описаны дифференциальными уравнениями низкого порядка. В основном они могут быть аппроксимированы аperiodическим звеном I-го (около 90%) или 2-го порядков с запаздыванием. При этом около 60% объектов имеют отношение $\tau/T < 0,3$.

За исключением процессов, связанных с изменением давления, это в основном медленно протекающие процессы с постоянными времени, измеряемыми минутами или десятками минут. Для процессов тепло- и массообмена постоянные времени при изменении знака управляющего воздействия могут изменяться в $1,2 + 2$ раза.

Большинство разработанных для пищевой промышленности АСР являются системами стабилизации технологических параметров; Поэтому в работе исследовалась автоматическая система стабилизации для объекта, аппроксимируемого аperiodическим звеном I-го порядка с запаздыванием и изменяющейся постоянной времени.

Анализ автономной релейной АСР

В трудах А.А. Андропова, Я.З. Ципкина, Н.А. Королева, Е.П. Попова, И.П. Пальтова, И. Фльгге-Лотц и других ученых были разработаны точные и приближенные методы исследования релейных

систем. В частности, были определены основные особенности релейных АСР с постоянной скоростью сервомеханизма и двухпозиционных систем для идеализированного объекта. Н.М. Лициным и В.К. Рутсом было показано, что изменение постоянной времени при разных знаках управления существенно влияет на режимы работы двухпозиционной АСР.

Все эти исследования проводились различными методами, что не позволяет проводить анализ систем при одновременном учете реальных неидеальностей объекта и регулятора.

Поскольку исследуемая релейная АСР имеет второй порядок, анализ ее работы проводился методом фазовой плоскости. С целью получения закономерностей, общих для рассматриваемого типа систем, все величины были приведены к безразмерному виду.

Рассматриваемая система и формулы перехода к безразмерным величинам приведены в табл. I автореферата.

Система с запаздыванием, изменяющейся постоянной времени, зоной нечувствительности и гистерезисом описывается следующими дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} + \dot{\psi} &= 1 && \text{при } U_+(t-\tau) = L; \\ \ddot{\psi} + \dot{\psi} &= 0 && \text{при } U_+(t-\tau) = 0; \\ a\ddot{\psi} + \dot{\psi} &= -1 && \text{при } U_-(t-\tau) = -L; \\ a\ddot{\psi} + \dot{\psi} &= 0 && \text{при } U_-(t-\tau) = 0, \end{aligned} \quad (I)$$

где U_+, U_- - функции, определяющие знак управляющего воздействия перед его отключением;

a - величина, характеризующая изменение постоянной времени при различных знаках управления.

Таблица I

1	
2	<p>ФОРМУЛЫ СВЯЗИ РАЗМЕРНЫХ И БЕЗРАЗМЕРНЫХ ВЕЛИЧИН</p> $\varphi = \frac{y}{KLT}; \quad \gamma = \frac{\alpha}{KLT}; \quad \sigma = \frac{\beta}{KLT}; \quad \mu = \frac{\tau}{T}; \quad a = \frac{T_1}{T}; \quad t_1 = \frac{t}{T}$ $K = K_1 K_2; \quad V = \dot{\psi}$
3	<p>ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ</p>
4	<p>СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ОРДИНАТЫ ТОЧЕК А И А' И ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ТОЧКИ В ЗОНАХ $-\sigma < \gamma$ И $\sigma > \gamma$</p> $V_A e^{\mu} - a V_A e^{\mu/a} + \ln \frac{1 - V_A}{1 - V_A e^{-\mu/a}} - (1-a) V_A e^{-\mu/a} - \eta - \eta_1 = 0;$ $V_{A'} e^{\mu} - a V_{A'} e^{\mu/a} + \ln \frac{1 + V_{A'}}{1 + V_{A'} e^{-\mu}} - (1-a) V_{A'} e^{-\mu} - \eta - \eta_1 = 0;$ $\left. \begin{aligned} (1 - V_A)(1 - e^{-\eta}) e^{\mu} + \gamma + \sigma - \eta = 0; \\ a(1 + V_{A'})(1 - e^{-\eta/a}) e^{\mu/a} + \gamma + \sigma - \eta = 0; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{при } \varphi_A > \gamma \\ &\varphi_A < \gamma \end{aligned}$

Продолжение табл. I

4	$\left. \begin{aligned} \rho n \frac{V_A}{V_A e^{\mu} - q - \gamma} + \mu - \eta &= 0; \\ \alpha \rho n \frac{\alpha V_A'}{V_A' e^{\mu/\alpha} + q + \gamma} + \mu - \eta_1 &= 0; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \text{при } \varphi_A &< \gamma \\ \varphi_A' &> -\gamma \end{aligned}$ <p>ГДЕ η, η_1 - ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ТОЧКИ В ЗОНАХ - $\sigma \rightarrow \gamma$; $\sigma \rightarrow -\gamma$. $q = e^{\mu} - 1 - \mu + \sigma$; $q_1 = \alpha e^{\mu/\alpha} - \alpha - \mu + \sigma$.</p>
5	$V_B = V_A \cdot e^{-\eta}; \quad V_B' = V_A' \cdot e^{-\eta_1/\alpha}$
6	<p>АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ</p> $\varphi_{\max} = a[V_A e^{\mu/\alpha} - \rho n(1+V_A)] + q_1; \quad \varphi_{\max} = V_A e^{\mu} + \rho n(1-V_A) - q.$ <p>ПЕРИОД АВТОКОЛЕБАНИЙ</p> $\Theta = \rho n \left[\frac{1-V_B'}{1-V_A} \left(\frac{1+V_B}{1+V_A} \right)^{\alpha} \right] + \eta + \eta_1;$ <p>СМЕЩЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ</p> $\Delta \varphi = \{ (1-\alpha^2)(V_B - V_B') + [\alpha V_A e^{\mu/\alpha} + (1-\alpha)V_B' + q_1 - 1] \cdot S + 0,5 \cdot S^2 + (V_A e^{\mu} - q) \cdot \eta - [V_A e^{\mu} - (1-\alpha)V_B - q + \alpha] \cdot H - 0,5 \cdot H^2 + (\alpha V_A' e^{\mu/\alpha} + q) \cdot \eta_1 \} \cdot \Theta,$ $S = J - (1-\alpha)V_B'; \quad H = J - (1-\alpha)V_B$ $J = V_A e^{\mu} - \alpha V_A' e^{\mu/\alpha} - q - q_1.$

В табл. I показаны возможные предельные циклы и приведены системы уравнений, определяющие ординаты точек А и А^I (V_A и V_A^I) и время перемещения (η, η_1) изображающей точки (ИТ) через зоны, в которых реле отключено. В системе из четырех уравнений два зависят от положения точек А и А^I относительно зоны нечувствительности.

В табл. I приведены также формулы для расчета амплитуд, периода автоколебаний и смещения среднего значения регулируемой величины, вызванного изменением постоянной времени. Рас-

считанные зависимости $\varphi(\gamma)$ и $\Theta(\gamma)$ позволяют определить ширину зоны нечувствительности (ЗН), при которой автоколебания срываются.

Анализ зависимости $\Delta \varphi(\gamma)$ показал, что введение ЗН уменьшает величину $\Delta \varphi$. При моделировании на АВМ получено хорошее совпадение результатов расчетов и моделирования. Для решения системы уравнений и расчета $\varphi_{\max+}$, $\varphi_{\max-}$, Θ и $\Delta \varphi$ была разработана на алгоритмическом языке Фортран программа с выбором уравнений в зависимости от выполнения условий $\varphi_A > \gamma$, $\varphi_A < -\gamma$. Формулы перехода к размерным величинам позволяют использовать эту программу при расчете промышленных релейных АСР.

Для системы с идеальным реле рассчитаны зависимости $\varphi_{\max}(\mu)$, $\Theta(\mu)$ и $\Delta \varphi(\mu, \alpha)$, которые могут быть непосредственно использованы в инженерной практике.

Релейная АСР с ограничением перемещения исполнительного органа (ИО) исследовалась при двустороннем и одностороннем ограничении. Ограничение перемещения ИО было приведено к координате φ . В табл. 2 автореферата приведены фазовые портреты системы при двустороннем ограничении, отличающиеся положением точек I и 4 относительно оси абсцисс. Это зависит от значений φ_{u1} и φ_{u2} (значений регулируемой величины при крайних положениях ИО) и приводит к различным системам уравнений, определяющих ординаты точек I, 4. Точка Z соответствует выходу ИО на ограничение.

Уравнения табл. 2 позволяют определить амплитуды, период автоколебаний и смещение среднего значения регулируемой величины, вызванное совместным влиянием несимметрии постоянной времени и ограничения перемещения ИО.

Таблица 2

1	<p>$\varphi_{u1}, \varphi_{u2}$ - УСТАНОВИВШИЕСЯ ЗНАЧЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПРИ КРАЙНИХ ПОЛОЖЕНИЯХ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА.</p> $\varphi_u = \frac{U_u}{KLT}$
2	<p>ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ</p>
3	<p>СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ОРДИНАТЫ ТОЧЕК Q2,3,5</p> $\left. \begin{aligned} V_0 + (1 - V_5)e^{\varphi_{u2} - V_0 + \delta V_5} - 1 &= 0 \\ V_0 - V_2 e^{\mu} + e^{\varphi_{u1} - V_0} - 1 &= 0 \\ V_2 - (1 - V_3)e^{\alpha(\varphi_{u1} - \delta V_2) - V_3} + 1 &= 0 \\ V_3 - V_5 e^{\alpha \mu} - e^{V_3 - \alpha \varphi_{u2}} + 1 &= 0 \end{aligned} \right\} \text{при } V_1 < \varphi_{u1}, V_0 > \varphi_{u2}$ <p>ГДЕ $\delta = 1 - \alpha$; $\alpha = 1 : a$</p> <p>ПЕРИОД АВТОКОЛЕБАНИЙ</p> $\theta = \ln \left[\frac{1 - V_5}{1 - V_2 e^{\mu + V_0 - \varphi_{u1}}} \left(\frac{1 + V_2}{1 + V_5 e^{\alpha(\mu + \varphi_{u2}) - V_3}} \right)^\alpha \right] + 2\mu - \varphi_{u1} + \varphi_{u2} + V_0 - \alpha V_3$ <p>СМЕЩЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ</p> $\Delta \varphi = \left\{ \varphi_{u1} (\mu + V_0) + \varphi_{u2} (\mu - \alpha V_3) - \delta (\varphi_{u1} - \varphi_{u2}) - [\delta (\varphi_{u1} + a) - 1 + a^2] V_2^2 - [\delta (\varphi_{u2} - 1) + 1 - a^2] V_5^2 + 0,5 \cdot (1 - a^2) (V_2^2 - V_5^2) \right\} : \theta$

Продолжение табл. 2

4	<p>УРАВНЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОРДИНАТЫ ТОЧЕК 1,2,4,5</p> $\left. \begin{aligned} V_2 &= V_0 e^{-\mu} - \varphi_{u1} e^{-\mu}; \\ V_4 &= (1 + V_2) e^{\alpha(\varphi_{u2} - \varphi_{u1} + \delta V_2)} - 1; \\ V_5 &= \varphi_{u2} e^{-\alpha \mu}; \\ V_1 &= 1 - (1 - \alpha V_5) e^{\varphi_{u2} - \varphi_{u1} + \alpha \delta V_5} \end{aligned} \right\} \text{при } V_1 > \varphi_{u1}; V_4 < \varphi_{u2}; \varphi_{u1} - \varphi_{u2} \geq \mu$ <p>ПЕРИОД АВТОКОЛЕБАНИЙ</p> $\theta = 2 \cdot (\varphi_{u1} - \varphi_{u2} + \mu) - \delta (V_2 + \alpha V_5) + \ln \left[\frac{V_1}{\varphi_{u1}} \left(\frac{\alpha V_4}{\varphi_{u2}} \right)^\alpha \right];$ <p>СМЕЩЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ</p> $\Delta \varphi = \left\{ \varphi_{u1} \left(\ln \frac{V_1}{\varphi_{u1}} + \mu \right) + \varphi_{u2} \left(\alpha \ln \frac{\alpha V_4}{\varphi_{u2}} + \mu \right) + \varphi_{u1}^2 - \varphi_{u2}^2 - \delta (\varphi_{u1} - \varphi_{u2}) - [\delta (\varphi_{u1} + a) - 1 + a^2] V_2^2 - [\delta (\varphi_{u2} - 1) + 1 - a^2] \alpha V_5^2 + 0,5 (1 - a^2) [V_2^2 - (\alpha V_5)^2] \right\} : \theta$
5	<p>АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ</p> $\varphi_{\max+} = \varphi_{u1} - \alpha \ln(1 + V_2) - \delta V_2; \quad \varphi_{\max-} = \varphi_{u2} + \ln(1 - V_5) + \delta V_5$

Анализ полученных уравнений показывает, что в автоколебательном режиме при $\varphi_{u1} - \varphi_{u2} < \mu$ зависимость $\varphi(t)$ приобретает вид, характерный для двухпозиционного регулирования. В размерных величинах это условие можно записать

$$U_{u1} - U_{u2} < K_1 K_2 L T. \quad (2)$$

При $U_{u1} - U_{u2} \ll K_1 K_2 L T$ релейную АСР с постоянной скоростью сервомеханизма можно рассматривать как двухпозиционную.

В работах А.А. Кампе-Немма, А.С. Клева и А.П. Копеловича исследована двухпозиционная АСР с идеальным объектом. В реферируемой работе двухпозиционная система рассмотрена при несимметричной постоянной времени объекта. Получены зависимости для определения φ_{\max} , θ и $\Delta \varphi$, которые могут быть непосредственно использованы при расчете систем.

В результате анализа релейной АСР при одностороннем ограничении перемещения ИО получены уравнения для определения предельного цикла и φ_{max} , θ и $\Delta\varphi$. Для решения уравнения численным методом разработана программа для ЭЦВМ. При моделировании на АВМ системы с односторонним ограничением перемещения ИО получено хорошее согласие между результатами расчета и моделирования.

Для оценки допустимых вариаций параметров релейной АСР в работе исследованы функции чувствительности (ФЧ) системы к изменению запаздывания, несимметрии постоянной времени и зоны нечувствительности. Показано, что ФЧ нелинейно зависят от параметров μ , a и γ . ФЧ амплитуды, периода автоколебаний и $\Delta\varphi$ зависят от K_1, K_2, L и T линейно. Рассчитанные в безразмерном виде ФЧ системы к изменению μ и a могут быть непосредственно использованы при расчете релейных АСР.

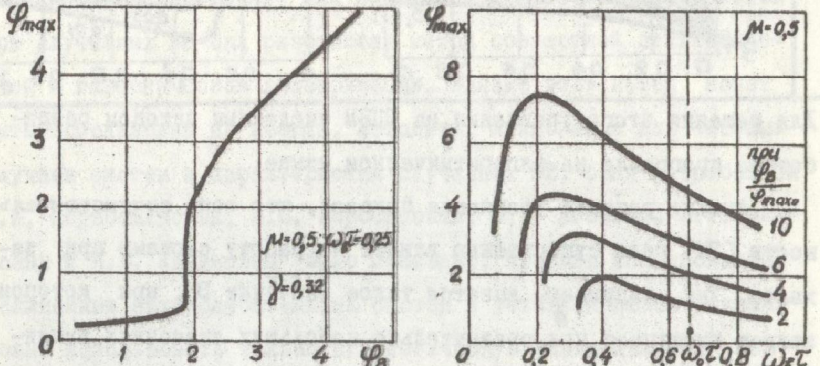
Исследование релейной АСР, подверженной возмущающим воздействиям

В соответствии с поставленной задачей исследовалась система с запаздыванием и зоной нечувствительности реле при постоянной скорости перемещения ИО и возмущающем воздействии (ВВ) на входе объекта.

Релейные системы, подверженные гармоническим ВВ, исследовались в работах Е.П. Попова, И.П. Пальтова, Я.З. Цыпкина, В.В. Павлова, Дз. Ямагути, М. Нисимуры, Т. Марухаси, К. Фудзии и других ученых. Однако особенности работы рассматриваемой релейной АСР не были изучены.

При анализе системы использовался метод гармонической линеаризации. В безразмерном виде получены условия захвата и уравнение, определяющее амплитуду вынужденных колебаний (табл. 3).

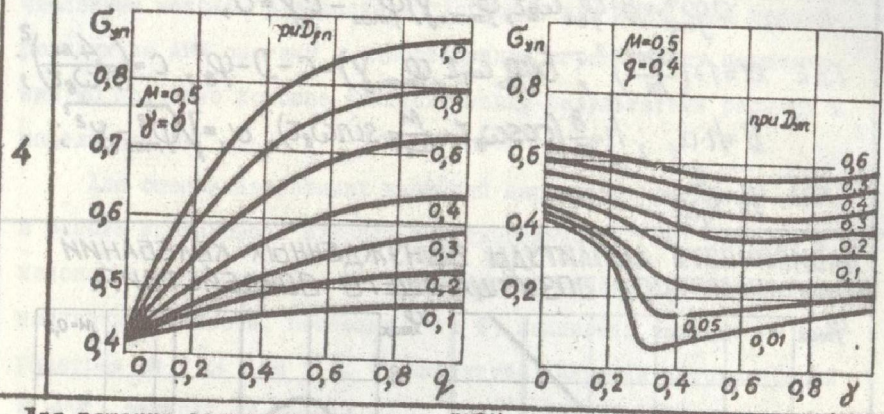
Таблица 3

1	<p>УРАВНЕНИЕ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ АМПЛИТУДУ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ $f(t) = B \sin \omega_0 t$</p> $a\varphi_{max}^4 + b(\varphi_0, \omega_0 T, \varphi_{max}, \gamma)\varphi_{max}^2 - c\gamma = 0,$ <p>ГДЕ $\alpha = 1 + (\frac{\omega_0 T}{\mu})^2$; $b(\varphi_0, \omega_0 T, \varphi_{max}, \gamma) = c - D - \varphi_0^2$; $c = (\frac{4M}{\pi \omega_0 T})^2$; $D = h \cdot \alpha$; $h = \frac{B}{T} (\cos \omega_0 T + \frac{M}{\omega_0 T} \sin \omega_0 T)$; $\alpha_1 = \sqrt{\varphi_{max}^2 - \gamma^2}$; $\varphi_0 = \frac{B}{K_1 L T}$.</p>
2	<p>ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.</p> 
3	<p>УРАВНЕНИЕ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ σ, ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ $G M[f] = 0$ И $R_H = D_f e^{-\alpha t }$</p> $E \sigma_{ин}^3 - P R(\gamma, \sigma_{ин}) \cdot \sigma_{ин}^2 + [G_1 R^2(\gamma, \sigma_{ин}) - G_2 D_{fn}] \sigma_{ин} + H R(\gamma, \sigma_{ин}) D_{fn} = 0,$ <p>ГДЕ $\sigma_{ин} = \frac{G\gamma}{K_1 L T}$; $D_{fn} = D_f (\frac{K_2}{K_1 L T})^2$; $E = a_1 q$; $a_1 = 2 + \mu$; $q = \alpha T$; $b_1 = \mu q^3 + a q^2 + 2q$; $c_1 = \mu q - 2$; $P = 2a_1 c_1 + \mu b_1 (4 + \mu)$; $G_1 = \mu c_1 (4 + \mu)$; $G_2 = 2a_1 q (q\mu + 2)$; $H = c_1 q \mu^2$; $R(\gamma, \sigma_{ин}) = 0,5 \left\{ [1 - 2\Phi(\frac{\gamma}{\sigma_{ин}})]^2 + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\gamma}{\sigma_{ин}})^2} \right\}$; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$.</p>

026.012501
 Одесский технологический институт пищевой промышленности

Продолжение табл. 3

ЗАВИСИМОСТИ $G_{\text{вн}}$ ОТ ПАРАМЕТРОВ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И СИСТЕМЫ.



Для решения этого уравнения на ЭЦВМ численным методом разработана программа на алгоритмическом языке.

Анализ решений уравнения показал, что зона нечувствительности (ЗН) реле существенно влияет на работу системы при захвате. Так, например, имеется такое значение ЗН, при котором захват наступает при сравнительно небольших значениях амплитуды (А) ВВ. При этом существует диапазон АВВ, в котором изменение АВВ слабо влияет на А вынужденных колебаний (ВК), но влияет на их форму. При некотором значении АВВ происходит скачкообразное изменение АВК (см. табл. 3), а форма их становится близкой к гармонической.

В рассматриваемой системе на частотах ниже частоты автоколебаний наступают резонансные явления. При этом с увеличением АВВ резонансный пик смещается в сторону более низких частот (табл. 3). Показано, что с увеличением запаздывания влияние ВВ на систему возрастает.

Полученные закономерности проверены моделированием на АВМ. Они позволяют определить целесообразность применения релейной АСР при конкретных характеристиках ВВ и выбрать такие настройки (γ и K, L), при которых АВК имеет приемлемую величину.

Наиболее распространены случайные ВВ. В большинстве случаев принимается гипотеза о их стационарности.

К настоящему времени В.С. Пугачевым, И.Е. Казаковым, Б.Г. Доступовым, А.А. Первозванским и другими учеными разработаны методы исследования нелинейных систем, подверженных случайным воздействиям. Для расчета автоколебательных систем при случайных ВВ был разработан метод совместной статистической и гармонической линеаризации. Однако этот метод может быть использован не всегда. Методики, применимые для частных случаев систем и характеристик случайных ВВ, были разработаны А.А. Первозванским, И.С. Моросановым, В.М. Агеевым, Л.Г. Евлановым и И.Е. Казаковым было показано, что для исследования нелинейных автоколебательных систем в установившихся режимах можно использовать только статистическую линеаризацию. Эта методика и была принята при анализе рассматриваемой системы.

Как показали исследования, проведенные институтом ВНИИ "Пищепромавтоматика", для условий пищевой промышленности наиболее характерны случайные (С)ВВ с корреляционной функцией

$$R_{ff}(\tau) = D_f \cdot e^{-\alpha|\tau|} \quad (3)$$

и математическим ожиданием $M[f] = 0$. Поэтому рассматриваемая релейная АСР исследовалась при СВВ с $R_{ff}(\tau)$ вида (3).

В работе получено нелинейное уравнение для определения среднего квадратического отклонения регулируемой величины (G_y)

в зависимости от параметров системы и характеристик ВВ, приложенных ко входу объекта (см. табл. 3). Для решения этого уравнения численным методом была разработана программа на алгоритмическом языке.

Анализ решений уравнения показывает, что при сравнительно небольших значениях Δ_f величина G_y может быть уменьшена введением зоны нечувствительности реле. При значительных Δ_f изменение зоны нечувствительности слабо влияет на величину G_y (см. табл. 3).

При некоторых соотношениях параметров системы и характеристик ВВ могут существовать такие значения K, L и γ , при которых G_y будет минимальным. В работе предложена методика расчета соответствующих настроек релейной АСР, основанная на использовании зависимостей $G_y(\Delta_f, \gamma)$, аналогичных приведенным в табл. 3.

В процессе эксплуатации АСР могут меняться ее параметры и характеристики ВВ. Для оценки влияния этих вариаций на регулируемую величину в работе исследованы функции чувствительности системы к изменению ее параметров и характеристик гармонических и случайных ВВ.

Исследование системы с переменной структурой без дифференциаторов

Для процессов, не допускающих перерегулирования из-за возможной порчи обрабатываемых продуктов (например, вследствие разрушения витаминов, пригара и т.п.) целесообразно использовать СПС.

Принципы построения СПС разработаны С.В. Емельяновым, В.А. Тараном, Н.И. Уткиным, Е.А. Барбашиным, Н.Е. Костылевой,

Е.И. Геращенко и другими учеными. Известны примеры успешного применения СПС в металлургии, химической и пищевой промышленности. Однако необходимость использования дифференцирующих устройств усложняет эти системы и снижает их помехозащищенность. Поэтому представляет практический интерес исследование СПС без дифференциаторов. К настоящему времени принципы работы таких систем не изучены и не определены их свойства.

В работе исследована СПС без дифференциаторов, предложенная на кафедре автоматизации производственных процессов ОТИП им. М.В. Ломоносова (рис. 1а).

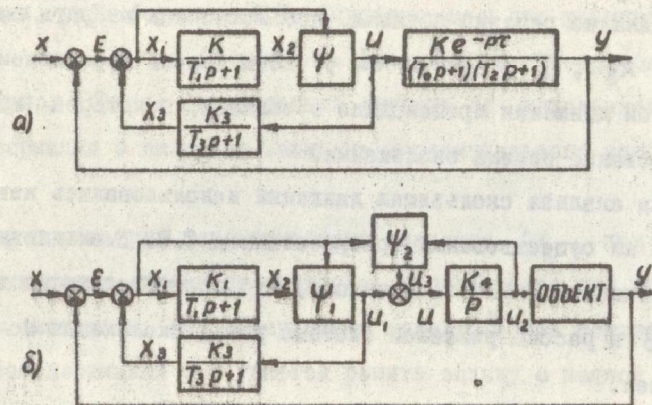


Рис. 1

В этой системе скользящее движение происходит за счет специального выбора структуры из инерционных звеньев и их параметров.

Условия переключения элемента Ψ имеют следующий вид

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } X_1 \cdot X_2 > 0; \\ \beta & \text{при } X_1 \cdot X_2 < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha > 0$ и $\beta < 0$. Параметры системы выбираются так, чтобы при $\psi = \alpha$ она была колебательной (устойчивой или неустойчивой), а при $\psi = \beta$ - аperiodически неустойчивой. Скользящее движение в системе возможно при $T_1 \ll T_0$ и $T_2 \ll T_0$ (где T_0 - наибольшая постоянная времени).

При исследовании СПС в свободном движении использовалась методика, разработанная С.В. Емельяновым и В.А. Тараном при анализе СПС с реальными дифференцирующими устройствами. Для определения момента первого переключения было получено трансцендентное уравнение, которое решалось на ЭЦВМ численным методом. Анализ решений показал, что можно так выбрать параметры K_1, K_2, T_1, T_2 и α , чтобы первое переключение при свободном движении происходило в области, в которой возможно существование режима скольжения.

Для анализа скользящих движений использовались известные условия их существования, разработанные С.В. Емельяновым и его учениками. В работе показано, что соответствующим выбором α и β в рассматриваемой системе режим скольжения может быть обеспечен.

В работе исследованы установившиеся периодические режимы в СПС. Получены коэффициенты гармонической линеаризации для переключающего элемента и уравнения для определения параметров колебательного режима и условий его существования. Анализ уравнений показал, что в системе могут возникать периодические движения двух видов. Они отличаются тем, что амплитуда колебаний на входе переключающего элемента больше или меньше постоянной составляющей. В обоих режимах амплитуда изменяется пропорционально постоянной составляющей.

Моделирование на АВМ подтвердило, что для каждой системы существует такое значение запаздывания, при котором в ней возникают устойчивые периодические движения. Форма сигналов близка к расчетной. Колебательный режим, при котором амплитуда превышает постоянную составляющую X_2 , возникает, когда постоянное или медленное меняющееся воздействие приложено ко входу системы. Второй вид периодических движений возникает, когда внешнее воздействие приложено ко входу объекта.

Анализ рассматриваемой СПС показал, что в ней существует статическая ошибка. Для устранения этой ошибки был использован принцип, разработанный С.В. Емельяновым и его учениками для управления СПС при вынужденном движении. В преобразованной СПС (рис. 1б) при формировании сигнала U используется также информация о выходной величине исполнительного устройства.

Выбор параметров переключающего элемента ψ_2 , при которых статическая ошибка отсутствует, производился при моделировании системы на АВМ. Результаты моделирования показали, что в преобразованной СПС удается решить задачу о полной воспроизводимости, когда постоянное или медленно изменяющееся внешнее воздействие приложено ко входу объекта.

Экспериментальная проверка разработанных методик расчета

При анализе теоретических результатов расчеты проверялись моделированием на АВМ при той же степени идеализации, которая была принята в исходных уравнениях. Поэтому для оценки применимости разработанных методик в инженерной практике, системы, рассчитанные по ним, исследовались в реальных условиях.

Проверка методик, связанная с существенными отклонениями технологического процесса от номинальных параметров (при ограничении перемещения ИО, в режиме захвата и т.п.), проводилась на экспериментальной лабораторной установке. Экспериментальная установка с тепловым объектом и промышленными средствами автоматики была разработана в ОТИП им. М.В. Ломоносова. Параметры объекта зависели от температуры нагревательного элемента, что свойственно многим промышленным объектам. При расчетах использовались средние значения параметров $\mu = 0,15$, $q = 1,3$.

Для проверки методики расчета релейной АСР при свободных автоколебаниях исследовалась система с постоянной скоростью сервомеханизма и различных значениях зоны нечувствительности реле до срыва автоколебаний. Рассчитанные зависимости и результаты эксперимента показаны на рис. 2а. Результаты расчета

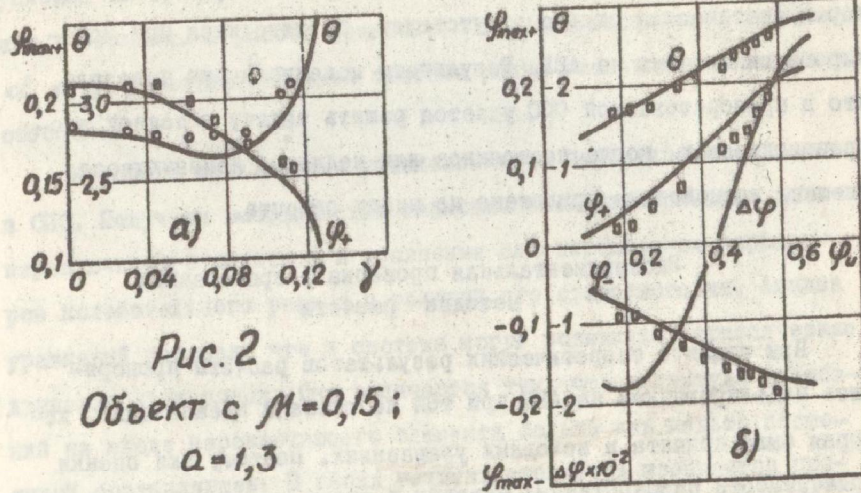


Рис. 2

Объект с $\mu = 0,15$;
 $q = 1,3$

отличаются от данных эксперимента на 4-6% при ошибке последнего 2-3%. Это расхождение объясняется влиянием неучтенных неидеальностей.

Релейная АСР с односторонним ограничением перемещения ИО исследовалась при изменении в широких пределах величины ограничения. Для периода автоколебаний результаты эксперимента и расчета отличались не более, чем на 7% при коэффициенте вариации экспериментальных данных 2% (рис. 2б). Для амплитуды автоколебаний это отличие было большим, что объясняется использованием в системе ступенчатого импульсного прерывателя.

При исследовании влияния гармонических ВВ отличие рассчитанной амплитуды вынужденных колебаний от экспериментального значения не превышало 4%, что находится в пределах точности эксперимента. Эксперимент проводился на нескольких частотах.

Методика определения настройки АСР, при которой σ_y минимально, использовалась для расчета промышленных систем. На рис. 3

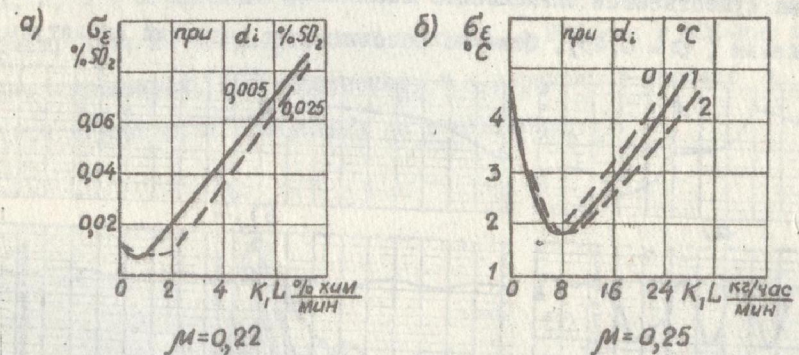


Рис. 3

показаны результаты расчета релейных АСР сернистой станции кукурузно-крахмального производства (а) и теплообменника вакуум-сушильной установки (б). В обоих случаях отношение $\tau/T > 0,2$, а $\sigma_{y_{мин}}$ не превышает величины, допустимой технологическими требованиями.

В промышленных условиях методика расчета релейной АСР с постоянной скоростью сервомеханизма проверялась на камерной сушилке СКП-6, предназначенной для сушки кукурузы в початках (на комбинате хлебопродуктов г. Золотоноши Черкасской обл.). Исследование проводилось при номинальных режимах. Амплитуда автоколебаний и ширина зоны нечувствительности, при которой происходит срыв автоколебаний, отличались от рассчитанных на 4% и 9,5% соответственно. На рис. 4а показаны переходные характеристики сушилки и запись процесса $y(t)$, включающая срыв автоколебаний. Результаты эксперимента подтверждаются протоколом.

Проверка методики расчета двухпозиционной релейной АСР производилась на кондиционирующей установке КС-18. На рис. 4б показаны экспериментальные переходные характеристики, из которых видна существенная зависимость постоянной времени от знака управления ($\alpha = 0,45$). Отличие рассчитанных значений амплитуды



Рис. 4

и периода автоколебаний от экспериментальных находилось в пределах точности эксперимента.

Эксперименты и расчеты показали, что во многих случаях релейные АСР могут применяться с объектами при $\tau/T > 0,2$. Это позволит при внедрении АСР в пищевой промышленности повысить экономический эффект от ав-

томатизации примерно на 20 тыс. руб. в год (за счет снижения стоимости регулятора на один канал регулирования, простоты обслуживания, надежности и т.п.).

Исследование свойств СПС без дифференциаторов и сравнение ее с системами с П- и ПИ-регуляторами производилось моделированием на АВМ.

Предложенная СПС с одной коммутацией ψ в переходном режиме работает существенно лучше, чем системы с П- и ПИ-регуляторами. При введении второй коммутации и использовании информации о выходной величине исполнительного устройства рассматриваемая СПС превосходит по своим динамическим показателям систему с ПИ-регулятором и работает без статической ошибки. Результаты сравнения систем с объектом, описываемым дифференциальным уравнением второго порядка с запаздыванием, показаны на рис. 5. Здесь 1, 2, 3 - переходные процессы в системе с ПИ-регулятором при настройках на аperiodический процесс, с 20%-ным и 40%-ным перерегулированием, соответственно, 4 - переходный процесс в СПС (при ступенчатом возмущении на входе объекта).

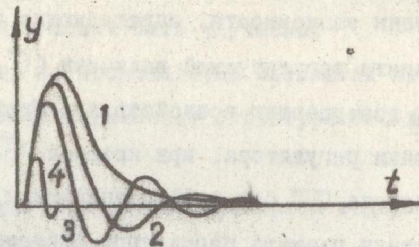


Рис. 5

Для оценки возможности создания промышленного регулятора переменной структуры была разработана его схема на элементах УЭСНПА.

Выводы и результаты

1. Исследован в автономном режиме общий случай работы релейной АСР второго порядка с постоянной скоростью сервомеханизма с учетом запаздывания, зависимости постоянной времени от знака управления и неидеальностей реле. Полученные результаты могут быть использованы при разработке таких систем на практике.

2. Выявлены свойства релейной АСР при ограничении перемещения исполнительного органа. Получены условия, при которых система с постоянной скоростью сервомеханизма может рассматриваться как двухпозиционная. Результаты могут быть рекомендованы для инженерной практики.

3. Показано, что при изменении амплитуды гармонических возмущающих воздействий амплитуда вынужденных колебаний релейной АСР может меняться скачком. При захвате в системе могут возникать резонансные явления на частотах ниже частоты автоколебаний. Результаты можно использовать при выборе регулятора и расчете его параметров.

4. Получены зависимости, определяющие среднее квадратическое отклонение регулируемой величины (σ_y) релейной АСР при случайных возмущающих воздействиях. Предложена методика выбора настройки регулятора, при которой σ_y минимально.

5. Предложена СПС без дифференцирующих устройств и разработана методика расчета параметров системы, обеспечивающих при свободном движении слабую зависимость скользящих режимов от начальных условий. Полученная методика может быть использована при проектировании СПС.

Кроме того получены следующие частные результаты:

а) изучен и классифицирован экспериментальный материал об особенностях объектов управления пищевой промышленности (отношении τ/T , несимметрии постоянных времени и т.п.), о законах управления и экономических моделях технологических процессов;

б) показано, что введение зоны нечувствительности в релейной АСР, работающей в автоколебательном режиме, уменьшает смещение среднего значения регулируемой величины, вызванное несимметрией постоянной времени объекта;

в) исследованы функции чувствительности релейной системы в автоколебательном режиме, при гармонических и случайных возмущающих воздействиях;

г) показаны преимущества предложенной СПС без дифференциаторов по сравнению с системами с линейными законами управления;

д) определены характерные периодические режимы СПС без дифференциаторов и условия их возникновения. Показано, что введением второй коммутации качество регулирования СПС при возмущенном движении может быть улучшено;

е) разработана на промышленных элементах пневмоавтоматики схема регулятора переменной структуры без дифференциаторов.

Основные результаты работы проверены моделированием на АБМ, на экспериментальной установке с физической моделью объекта и промышленными элементами автоматики, а также на промышленных объектах.

Показана применимость разработанных методик при инженерных расчетах релейных АСР и СПС без дифференциаторов.

Все аналитические зависимости приведены к безразмерным величинам и по ним разработаны методики и программы расчета релейных АСР на ЭЦВМ, предназначенные для инженерной практики.

Полученные результаты позволяют упростить процесс проектирования АСР и более обоснованно выбирать применяемые регуляторы.

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

1. Исследование установившегося режима релейной АСР второго порядка с запаздыванием и постоянной времени, зависящей от знака управления. "Известия вузов СССР. Электромеханика", № 10, 1972.

2. Прогнозирование в системах с переменной структурой как средство оптимизации их при управлении объектами с запаздыванием. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Организация работ вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления", УкрНИИТИ, Киев, 1972.

3. Исследование чувствительности релейной АСР второго порядка с запаздыванием. "Известия вузов СССР. Электромеханика", № 8, 1973.

4. Анализ работы релейной системы второго порядка с запаздыванием на фазовой плоскости. Сб. "Вопросы оптимального программирования в производственных задачах." Изд. Воронежского государственного университета. Воронеж, 1973.

5. Анализ релейной системы второго порядка с запаздыванием и зоной нечувствительности на фазовой плоскости. Сб. "Кибернетика и автоматическое управление", Киев, 1973.

6. Исследование работы релейной АСР второго порядка с запаздыванием, подверженной случайным воздействиям. "Известия вузов СССР. Электромеханика", № 5, 1974.

7. К вопросу о применении релейных АСР в пищевой промышленности. Сб. "Кибернетика и автоматическое управление", Киев, 1974.

8. Исследование релейной системы автоматического регулирования второго порядка с запаздыванием и зоной нечувствительности, подверженной влиянию случайных воздействий. "Известия вузов СССР. Приборостроение", № 10, 1974.

9. Анализ работы двухпозиционной АСР. Труды института "Пищепромавтоматика", вып. 12-13, 1974.

10. Исследование вынужденных колебаний релейной АСР второго порядка с запаздыванием. "Известия вузов СССР. Электромеханика", № 2, 1975.

Результаты исследований доложены:

1) на Республиканской научно-технической конференции "Организация работ вычислительных центров в условиях функционирования автоматизированных систем управления" (сентябрь 1972 года, г. Севастополь); 2) на семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" (апрель 1972 года, г. Одесса); 3) на семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" (апрель 1973 года, г. Одесса).