

6
A-55

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

ДАНОВСКИ И. Т.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ПРОГРАММНОГО КОНТУРА
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА
СУДОВОГО ПАРОВОГО КОТЛА
ПРИ УЧЕТЕ ОСНОВНЫХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ**

(05.254 — Автоматическое управление
и регулирование судовых энергетических установок)

Ленинград



1970

На правах рукописи

ДАНОВСКИ И.Т.

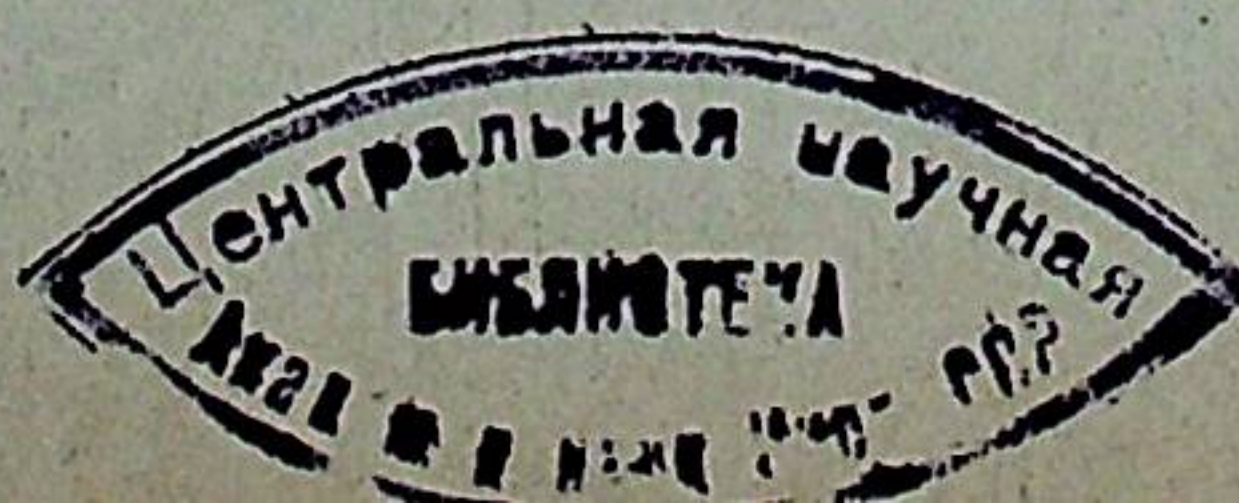
**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОГРАММНОГО КОНТУРА
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА СУДОВОГО ПАРОВОГО
КОТЛА ПРИ УЧЕТЕ ОСНОВНЫХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ**

(05.254 - Автоматическое управление и
регулирование судовых энергетических
установок)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград

1970.



Работа выполнена в лаборатории кафедры автоматики и контроля корабельных энергетических установок Ленинградского высшего военно-морского инженерного училища.

Научный руководитель — доктор технических наук профессор НЕЛЕПИН Р.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук профессор НИКОЛАЕВ В.И.,
кандидат технических наук доцент СЫРОМЯТНИКОВ В.Ф.

Ведущее предприятие —

Автореферат разослан "18" декабря 1970 г.

Защита диссертации состоится " " февраля 1971 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней факультета корабельной энергетики Ленинградского ордена Ленина кораблестроительного института, г. Ленинград, ул. Лоцманская, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы просим направлять в двух экземплярах в адрес Ученого Совета, г. Ленинград, Ф-8, Лоцманская ул., д.3.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
К.Т.Н. доцент

РАЛЬЦЕВИЧ Н.В.

Тип. ЛКИ. Зак. Р-784. Тир. 170. Уч.-изд. л. 1,3. М-13916
10.12.70 г. Бесплатно

Среднеэксплуатационная экономичность судовой паросиловой установки определяется, в частности, и совершенством автоматических устройств, управляющих процессом сгорания топлива в топке судового котла.

В настоящее время для управления горением топлива используются системы регулирования, которые контролируют некоторые косвенные показатели качества процесса и в зависимости от нагрузки котла поддерживают определенное соотношение между расходом воздуха и топлива в топку котла.

Необходимость строить системы регулирования процесса сгорания топлива на принципе контролирования косвенных показателей его качества вызвана отсутствием малоинерционных и надежно работающих в условиях продолжительной эксплуатации на судне анализаторов состава дымовых газов, которые можно было бы использовать в качестве измерительных элементов в данных системах регулирования.

Широкое распространение в практике регулирования горения топлива в топках судовых котлов получила разработанная в ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова гидравлическая система, построенная на струйных усилительных элементах и использующая питательную воду котлов в качестве рабочей жидкости. Эта система построена по, так называемому, принципу "воздух по топливу", при котором регулирование подачи воздуха в топку котла осуществляется программной системой регулирования давления воздуха в коробе котла.

Свойства программной системы регулирования давления воздуха в большой степени определяют экономичность и бездымность работы котельной установки и поэтому система должна с высокой точностью поддерживать требуемые значения давления воздуха не только на всех установившихся режимах, но и при маневрировании котельной установкой.

Для обеспечения статической точности регулирования дав-

ления воздуха программная система очень часто снабжается гибкой обратной связью. Гибкая обратная связь программной системы регулирования, объект регулирования которой не обладает достаточным саморегулированием на некоторых, чаще всего, на малых нагрузках, используется для обеспечения необходимого запаса устойчивости процесса регулирования и для обеспечения требуемого соотношения топливо-воздух на статические режимы котельной установки.

Программной системе в силу инерционности передачи импульса, развиваемого котлом от приложения к нему внешнего воздействия со стороны потребителей пара к регулируемому органу давления воздуха, в динамике присуще рассогласование между требуемым и действительно поддерживаемым системой значениями регулируемой величины. Кроме того, для обеспечения бездымности горения топлива при маневре в условиях длительной эксплуатации система регулирования горения настраивается с определенным запасом по воздуху. Запас статической характеристики процесса регулирования давления воздуха и возникающее в динамике рассогласование между требуемым и действительно поддерживаемым системой значениями давления воздуха снижают среднеэксплуатационную экономичность котельной установки.

Для уменьшения рассогласования между требуемыми и действительно поддерживаемыми системой регулирования значениями давления воздуха применяются: двойной дроссельный клапан с шариком, особая конструкция форсуночных сервомоторов и специальные корректирующие устройства, способствующие организации опережения подачи воздуха перед подачей топлива. Из упомянутых конструктивных мероприятий, способствующих уменьшению рассогласования, наиболее радикальным является применение, так называемых, "ускорителей по воздуху", оказывающих дополнительное воздействие на систему во время ее переходных процессов.

На динамическую точность системы регулирования давления воздуха существенное влияние оказывают нелинейности статических характеристик звеньев. Некоторые нелинейности влияют также и на статическую точность регулирования давления воздуха судового котла. При определенных значениях параметров системы и параметров, характеризующих нелинейности звеньев, в системе могут возникать автоколебания. Автоколебательные режимы работы совершенно недопустимы с точки зрения требова-

ний, которые предъявляет к качеству процесса регулирования эксплуатация котельной установки судна.

К основным факторам, порождающим существенные нелинейности звеньев системы, относятся: сухое трение и люфты в программном регуляторе давления воздуха; протечки рабочей жидкости и ограничение скорости гидравлического сервомотора, натяжение нулевой пружины и ограничение перемещений мембраны изодрома упорами, люфты в рычажной системе исполнительного устройства регулятора и др. Гибкая обратная связь системы регулирования выполняется на основе существенно нелинейного мембранного изодрома выключающегося типа. Выключение гибкой обратной связи на определенных участках переходных процессов системы применяется для увеличения ее быстродействия, для этого в мембране изодрома смонтированы пружинные клапаны, сообщающие обе полости изодрома при выходе мембраны на упор.

Таким образом, программная изодромная система регулирования является существенно нелинейной, некоторые нелинейности которой возникают в силу протекающих при передаче сигналов в ее звеньях физических процессов, а другие являются следствием конструктивных мероприятий, применяемых для улучшения качественных показателей регулирования давления воздуха. Вместе с тем, исследование свойств этой системы на основе рассмотрения ее нелинейной математической модели связано с большими трудностями. Трудности исследования нелинейных моделей программной системы регулирования давления воздуха можно объяснить отсутствием регулярных методов исследования динамического поведения нелинейных систем дифференциальных уравнений порядка выше второго и сложностью схемы подключения нелинейностей в самой системе.

Вышеотмеченные трудности исследования нелинейных математических моделей в большой степени обуславливают то, что проектирование данной системы регулирования в настоящее время выполняется на основе рассмотрения ее линейной модели, а доработку и наладку системы осуществляют на выполненном ее образце головного судна серии.

В реферируемой диссертационной работе аналитически и на ЭВМ исследуются динамические свойства свободных и вынужденных движений системы регулирования давления воздуха на основе рассмотрения ее нелинейных математических моделей, учитывающих влияние основных нелинейностей звеньев этой системы.

Диссертационная работа состоит из трех глав, выводов и приложений.

Первая глава имеет вводный характер. В ней делается анализ способов решения проблемы автоматизации процесса подачи воздуха в топку судового котла. В этой главе сделан обзор исследований по проблеме регулирования горения топлива в топках судовых котлов и рассмотрены различные схемы системы регулирования процесса топливосжигания. Рассмотрены также требования, предъявляемые к конкретным системам регулирования подачи воздуха и сделан вывод о необходимости при данном исследовании ориентироваться на гидравлическую систему, разработанную в ЦНИИ им.акад.Крылова.

Ульянов Б.Д. исследовал нелинейную модель этой системы и показал, что ее структура в значительной степени лимитирует средства повышения динамической точности регулирования давления воздуха. К сожалению, при этом не учитывалось влияние существенно нелинейной выключающейся обратной связи программной системы регулирования давления воздуха.

В данной главе на основе качественного анализа физических процессов преобразования сигналов в звеньях построена достаточно полная нелинейная математическая модель исследуемой системы в виде

$$\left. \begin{aligned} T_2^2 \frac{d^2 \rho}{dt^2} + T_k \frac{d\rho}{dt} + \delta_u \rho + \delta \mu_i + \delta d_2 \tilde{g}_1(t) &= \delta_1 \varphi - \frac{\varepsilon}{2} \left(\text{sign} \frac{d\rho}{dt} \right) - d_1 \mu_T(t) \\ \rho = \text{const.} \text{ при } \left| T_2^2 \frac{d^2 \rho}{dt^2} + T_k \frac{d\rho}{dt} + \delta_u \rho + \delta \mu_i + \delta d_2 \tilde{g}_1(t) - \delta_1 \varphi + d_1 \mu_T(t) \right| &\leq \frac{\varepsilon}{2}, \\ \text{при } \frac{d\rho}{dt} \neq 0, \\ T_0^2 \frac{d^2 \mu_i}{dt^2} + T_2 \frac{d\mu_i}{dt} + z \mu_i &= -\beta_i T_i \frac{d\mu}{dt} - \frac{\varepsilon_1}{2} \left(\text{sign} \frac{d\mu_i}{dt} \right) \text{ при } |\mu_i| < 1 \\ \mu_i = \text{const.} \text{ при } \left| T_0^2 \frac{d^2 \mu_i}{dt^2} + T_2 \frac{d\mu_i}{dt} + z \mu_i + \beta_i T_i \frac{d\mu}{dt} \right| &\leq \frac{\varepsilon_1}{2} \text{ и при } |\mu_i| = 1; \\ \text{и } \frac{d\mu_i}{dt} \neq 0, \\ T_{s1}^2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + T_s \frac{d\mu}{dt} + \tau \mu &= \tau_1 \mu_i - f_1(\rho) + \frac{\varepsilon_2}{2} \left(\text{sign} \rho \right) \text{ при } \rho \neq 0, \\ \mu = \text{const.} \text{ при } \left| T_{s1}^2 \frac{d^2 \mu}{dt^2} + T_s \frac{d\mu}{dt} + \tau \mu - \tau_1 \mu_i + f_1(\rho) \right| &\leq \frac{\varepsilon_2}{2}; \\ T_a \frac{d\varphi}{dt} + z \varphi &= \mu - F(t), \end{aligned} \right\} (I)$$

где $T_2 = T_1 + T_1$.

В системе дифференциальных уравнений (I) обозначено:
 φ - регулируемая величина; μ - координата исполнительного устройства; μ_i - координата изодрома; ρ - координата основного измерительного элемента; $F(t)$ - возмущающее воздействие; $\tilde{g}_1(t)$ - импульсное воздействие, развиваемое "ускорителем по воздуху" и пропорциональное перепаду давлений рабочей жидкости на дроссельный клапан регулятора давления пара; $\mu_T(t)$ - программное воздействие (от задающего лекала, связанного с сервомотором регулятора давления пара); T_0^2, T_{s1}^2, T_2^2 - временные постоянные, сек²; $T_k, T_i, T_2, T_1, T_s, T_a$ - временные постоянные, сек; Z - коэффициент саморегулирования объекта; τ_1 - коэффициент, учитывающий влияние мембраны изодрома на перемещение поршня сервомотора; τ - коэффициент, учитывающий пружинную нагрузку на сервомотор; z - коэффициент, учитывающий упругие свойства механизма обратной связи; δ_1 - коэффициент, учитывающий упругие свойства чувствительного элемента; δ - динамический коэффициент неравномерности процесса регулирования; δ_u - коэффициент неравномерности измерительного элемента; d_2 - безразмерный коэффициент, учитывающий интенсивность дополнительного воздействия $\tilde{g}_1(t)$; d_1 - безразмерный коэффициент; $\frac{\varepsilon}{2}$ - нечувствительность измерительного элемента; $\frac{\varepsilon_1}{2}$ - нечувствительность изодрома; $\frac{\varepsilon_2}{2}$ - нечувствительность исполнительного устройства; β_i - коэффициент, учитывающий конструктивные особенности изодрома; $f_1(\rho)$ - нелинейная функция.

Функция $f_1(\rho)$ учитывает влияние мертвой зоны и насыщения характеристики сервомотора на его динамические свойства и описывается следующими уравнениями:

$$f_1(\rho) = \begin{cases} \kappa_3 \rho - \kappa_3 h_1, & \text{при } h_2 \geq \rho \geq h_1; \\ \kappa_3 \rho + \kappa_3 h_1, & \text{при } -h_2 \leq \rho \leq -h_1; \\ \kappa_3 (h_2 - h_1) \text{sign} \rho & \text{при } |\rho| \geq h_2; \\ 0 & \text{при } |\rho| \leq h_1, \end{cases} \quad (2)$$

где κ_3, h_1, h_2 - постоянные.

По классификации Е.П.Попова, полученная математическая модель (I), (2), относится к наиболее сложному третьему классу нелинейных систем и структурно никаким преобразованием не может быть представлена в виде одной линейной и одной нели-

нейной части.

В первой главе выполнен далеко не полный и, в некотором отношении, поверхностный анализ методов исследования нелинейных автоматических систем и сформулирована задача исследования:

а) рассмотреть возможность применения метода сечения пространства параметров при исследовании динамических свойств программной системы регулирования давления воздуха, поступающего в топку судового парового котла, с целью определения частей бифуркационных поверхностей системы при учете сухого трения в основном измерительном элементе и мертвой зоны характеристики сервомотора регулятора давления воздуха;

б) моделированием на аналоговой электронной вычислительной машине движений в программной системе регулирования подачи воздуха в топку судового котла исследовать влияние основных нелинейностей системы на статическую и динамическую точность процесса регулирования с целью выявления возможностей уменьшения рассогласования между требуемым и действительно поддерживаемым количеством поступающего в топку котла воздуха. Выявить влияние стабилизирующего устройства системы, которое в настоящее время выполняется в виде существенно нелинейной гибкой обратной связи выключающегося типа, на устойчивость и точность процесса регулирования давления воздуха.

Во второй главе диссертационной работы точным аналитическим методом сечений пространства параметров исследуется динамическое поведение программной системы регулирования давления воздуха судового котла. Гибкая обратная связь системы предполагается линейной. При исследовании динамического поведения системы регулирования ее нелинейная математическая модель принята в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta_\kappa}{dt} &= \sum_{\alpha=1}^3 a_{\kappa\alpha} \eta_\alpha + b_\kappa y, \quad \kappa=1,2,3, \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}), \quad \sigma = \sum_{i=1}^2 c_i \eta_i, \end{aligned} \right\} (3)$$

где

$$y = f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}) = \begin{cases} \kappa\sigma - \kappa h_1 - \kappa\sigma_2 \operatorname{sign} \frac{dy}{dt} & \text{при } \frac{dy}{dt} \neq 0 \text{ и } y > 0; \\ \kappa\sigma + \kappa h_1 - \kappa\sigma_2 \operatorname{sign} \frac{dy}{dt} & \text{при } \frac{dy}{dt} \neq 0 \text{ и } y < 0; \\ \operatorname{const.} \begin{cases} \text{при } |y - \kappa\sigma + \kappa h_1| \leq \kappa\sigma_2 \text{ и } y > 0, \\ \text{любо } |y - \kappa\sigma - \kappa h_1| \leq \kappa\sigma_2 \text{ и } y < 0; \end{cases} \\ 0 & \text{при } |\sigma| \leq h_1 - \sigma_2, \text{ если } h_1 > \sigma_2. \end{cases} (4)$$

Система дифференциальных уравнений (1) с нелинейной функцией (2) алгебраическими преобразованиями приводится к виду (3), (4) при выполнении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \kappa_3 \delta_u^{-1}; \quad \sigma_2 = \frac{\varepsilon}{2}; \quad h_2 = \infty; \quad \rho_T(t) = \operatorname{const.}; \quad F(t) = 0; \quad \tilde{q}_1(t) = 0; \\ T_0 &= 0; \quad T_2 = 0; \quad T_\kappa = 0; \quad T_{31} = 0; \quad \frac{\varepsilon_1}{2} = 0; \quad \frac{\varepsilon_2}{2} = 0; \quad \varphi = \eta_1; \\ \mu_1 &= \eta_2; \quad \mu = \eta_3; \quad \delta_1 = c_1; \quad \delta = -c_2; \quad \sigma = \delta_1 \varphi - \delta \mu_1; \quad b_1 = 0; \\ a_{31} &= 0; \quad a_{12} = 0; \quad a_{21} = 0; \quad \frac{1}{T_0} = a_{13}; \quad \frac{2}{T_2} = -a_{11}; \\ \left(\frac{2}{T_2} + \frac{\beta_i T_i \tau_i}{T_2 T_3} \right) &= -a_{22}; \quad \frac{1}{T_3} = -a_{33}; \quad \frac{\tau_1}{T_1} = a_{32}; \quad \frac{1}{T_3} = -b_3; \\ \frac{\beta_i T_i}{T_2 T_3} &= b_2; \quad \frac{\beta_i T_i \tau_i}{T_2 T_3} = a_{23}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Неособым линейным преобразованием переменных система (3) с функцией (4) приводится к каноническому виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_\kappa}{dt} &= \lambda_\kappa x_\kappa + y, \quad \kappa=1,2,3, \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}), \quad \sigma = \sum_{i=1}^3 \gamma_i x_i, \end{aligned} \right\} (6)$$

где

$$\gamma_i = - \frac{1}{dD(\lambda_i)} \Big|_{p=\lambda_i} \sum_{\kappa=1}^2 c_\kappa N_\kappa(\lambda_i), \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

нейной части.

В первой главе выполнен далеко не полный и, в некотором отношении, поверхностный анализ методов исследования нелинейных автоматических систем и сформулирована задача исследования:

а) рассмотреть возможность применения метода сечения пространства параметров при исследовании динамических свойств программной системы регулирования давления воздуха, поступающего в топку судового парового котла, с целью определения частей бифуркационных поверхностей системы при учете сухого трения в основном измерительном элементе и мертвой зоны характеристики сервомотора регулятора давления воздуха;

б) моделированием на аналоговой электронной вычислительной машине движений в программной системе регулирования подачи воздуха в топку судового котла исследовать влияние основных нелинейностей системы на статическую и динамическую точность процесса регулирования с целью выявления возможностей уменьшения рассогласования между требуемым и действительно поддерживаемым количеством поступающего в топку котла воздуха. Выявить влияние стабилизирующего устройства системы, которое в настоящее время выполняется в виде существенно нелинейной гибкой обратной связи выключающегося типа, на устойчивость и точность процесса регулирования давления воздуха.

Во второй главе диссертационной работы точным аналитическим методом сечений пространства параметров исследуется динамическое поведение программной системы регулирования давления воздуха судового котла. Гибкая обратная связь системы предполагается линейной. При исследовании динамического поведения системы регулирования ее нелинейная математическая модель принята в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta_\kappa}{dt} &= \sum_{\alpha=1}^3 a_{\kappa\alpha} \eta_\alpha + b_\kappa y, \quad \kappa=1,2,3, \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}), \quad \sigma = \sum_{i=1}^2 c_i \eta_i, \end{aligned} \right\} (3)$$

где

$$y = f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}) = \begin{cases} \kappa\sigma - \kappa h_1 - \kappa\sigma_2 \operatorname{sign} \frac{dy}{dt} & \text{при } \frac{dy}{dt} \neq 0 \text{ и } y > 0; \\ \kappa\sigma + \kappa h_1 - \kappa\sigma_2 \operatorname{sign} \frac{dy}{dt} & \text{при } \frac{dy}{dt} \neq 0 \text{ и } y < 0; \\ \operatorname{const.} \begin{cases} \text{при } |y - \kappa\sigma + \kappa h_1| \leq \kappa\sigma_2 \text{ и } y > 0, \\ \text{любо } |y - \kappa\sigma - \kappa h_1| \leq \kappa\sigma_2 \text{ и } y < 0; \end{cases} \\ 0 & \text{при } |\sigma| \leq h_1 - \sigma_2, \text{ если } h_1 > \sigma_2. \end{cases} (4)$$

Система дифференциальных уравнений (1) с нелинейной функцией (2) алгебраическими преобразованиями приводится к виду (3), (4) при выполнении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \kappa_3 \delta_u^{-1}; \quad \sigma_2 = \frac{\varepsilon}{2}; \quad h_2 = \infty; \quad \rho_T(t) = \operatorname{const.}; \quad F(t) = 0; \quad \tilde{q}_1(t) = 0; \\ T_0 &= 0; \quad T_2 = 0; \quad T_\kappa = 0; \quad T_{s1} = 0; \quad \frac{\varepsilon_1}{2} = 0; \quad \frac{\varepsilon_2}{2} = 0; \quad \varphi = \eta_1; \\ \mu_i &= \eta_2; \quad \mu = \eta_3; \quad \delta_1 = c_1; \quad \delta = -c_2; \quad \sigma = \delta_1 \varphi - \delta \mu_i; \quad b_1 = 0; \\ a_{31} &= 0; \quad a_{12} = 0; \quad a_{21} = 0; \quad \frac{1}{T_0} = a_{13}; \quad \frac{\varepsilon}{T_2} = -a_{11}; \\ \left(\frac{\varepsilon}{T_2} + \frac{\beta_i T_i \tau_i}{T_2 T_s} \right) &= -a_{22}; \quad \frac{\tau}{T_s} = -a_{33}; \quad \frac{\tau_1}{T_s} = a_{32}; \quad \frac{1}{T_s} = -b_3; \\ \frac{\beta_i T_i}{T_2 T_s} &= b_2; \quad \frac{\beta_i T_i \tau}{T_2 T_s} = a_{23}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Неособым линейным преобразованием переменных система (3) с функцией (4) приводится к каноническому виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_\kappa}{dt} &= \lambda_\kappa x_\kappa + y, \quad \kappa=1,2,3, \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}), \quad \sigma = \sum_{i=1}^3 \gamma_i x_i, \end{aligned} \right\} (6)$$

где

$$\gamma_i = - \frac{1}{dD(\lambda_i)} \Big|_{p=\lambda_i} \sum_{\kappa=1}^2 c_\kappa N_\kappa(\lambda_i), \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

причем в рассматриваемом случае

$$N_2(\lambda_1) = 0. \quad (8)$$

Здесь применены следующие обозначения:

λ_k - собственные числа матрицы (a_{ki}) ;

$$D(p) = \det [a_{kk} - \delta_{kk} p]; \quad \left. \begin{aligned} \frac{dD(\lambda_i)}{dp} \Big|_{p=\lambda_i} &= \frac{dD(p)}{dp} \Big|_{p=\lambda_i} \end{aligned} \right\} (9)$$

$$N_k(\lambda_i) = \sum_{j=1}^3 \beta_j D_{jk}(\lambda_i);$$

δ_{kk} - символ Кронекера; $D_{jk}(\lambda_i)$ - алгебраическое дополнение элемента строки j столбца k определителя $D(\lambda_i)$.

Уравнения линейного преобразования, при помощи которых система (3), (4) приводится к каноническому виду (6) имеет вид

$$\eta_k = - \sum_{i=1}^3 \frac{N_k(\lambda_i)}{\frac{dD(\lambda_i)}{dp} \Big|_{p=\lambda_i}} x_i, \quad \kappa = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Условие невырожденности преобразования (10) сводится к следующему:

- 1) собственные числа матрицы (a_{ki}) должны быть простыми;
- 2) система дифференциальных уравнений (3) должна быть полностью управляемой к входу нелинейной функции (4).

Условие полной управляемости системы (3) по входу нелинейной функции (4) сводится к условию

$$\det \| H, AH, A^2H \| \neq 0, \quad (II)$$

где обозначено:

$A = (a_{ki})$ - матрица коэффициентов системы (3);

$H = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}$ - столбец коэффициентов β_k .

Физический смысл условия полной управляемости заключается в необходимости возбуждения колебаний нелинейной функции (4) на всех собственных частотах рассматриваемой системы (3).

Пусть коэффициенты a_{kk} , β_k в системе (3), (4) фиксированы, а коэффициенты C_1, C_2 - параметры. В этом случае в плоскости параметров C_1, C_2 при значениях коэффициентов a_{kk}, β_k

таких, при которых корни характеристического уравнения системы (3) простые и система полностью управляема к входу нелинейной функции (4), можно провести два вскрывающих сечения второго рода в виде подпространств размерности 1, т.е. в виде некоторых прямых.

Пусть числа λ_i ($i = 1, 2, 3$) простые.

В условиях вскрывающего сечения $G_2^{(1,s)}$ ($s = 2, 3$), а следовательно, $\gamma_j = 0$ ($j \neq 1, s$) каноническая система (6) запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_\kappa}{dt} &= \lambda_\kappa x_\kappa + y, \quad \kappa = 1, 2, 3; \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}); \quad \sigma = \gamma_1 x_1 + \gamma_s x_s, \quad s = 2, 3. \end{aligned} \right\} (12)$$

Каноническая система дифференциальных уравнений (12) в условиях вскрывающих сечений второго рода $G_2^{(1,s)}$ содержит независимую подсистему вида

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_\kappa}{dt} &= \lambda_\kappa x_\kappa + y, \quad \kappa = 1, s; \\ y &= f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}), \quad \sigma = \gamma_1 x_1 + \gamma_s x_s, \quad s = 2, 3 \end{aligned} \right\} (13)$$

Возможность выделить в канонической системе дифференциальных уравнений (6) в условиях рассматриваемого вскрывающего сечения независимую подсистему вида (13), динамическое поведение которой изучено методом точечных преобразований, достигается за счет наложения некоторого, вполне определенного в зависимости от значений фиксированных коэффициентов a_{kk} , β_k системы (3), (4), ограничения на параметры C_1 и C_2 системы дифференциальных уравнений (3), (4).

Вводя следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_s); & d_1 &= -(\gamma_1 + \gamma_s); \\ g_2 &= \lambda_1 \lambda_s; & d_2 &= \lambda_s \gamma_1 + \gamma_s \lambda_1, \quad s = 2, 3 \end{aligned} \right\} (14)$$

из системы дифференциальных уравнений (13) получим

$$\frac{d^2 \sigma}{dt^2} + g_1 \frac{d\sigma}{dt} + g_2 \sigma = -d_1 \frac{dy}{dt} - d_2 y, \quad y = f(\sigma, y, \frac{dy}{dt}). \quad (15)$$

Динамическое поведение системы (15) определяется значениями следующих существенных параметров:

$$A_2 = \frac{\alpha_0}{\alpha} \text{ (при } X^2 > 4Y) \text{ либо } A_1 = -\frac{\beta}{\alpha} \text{ (при } X^2 < 4Y);$$

$$B = \begin{cases} \alpha_0 \mu_0^{-1} \text{ при } X^2 > 4Y, g_1^2 > 4g_2; \\ (\beta^2 + \alpha^2) (\mu_0 \alpha)^{-1} \text{ при } X^2 < 4Y, g_1^2 > 4g_2; \\ \alpha_0 \mu_2 (\mu_2^2 + \nu_2^2)^{-1} \text{ при } X^2 > 4Y, g_1^2 < 4g_2; \\ (\alpha^2 + \beta^2) \mu_2 (\mu_2^2 + \nu_2^2)^{-1} \alpha^{-1} \text{ при } X^2 < 4Y, g_1^2 < 4g_2; \end{cases} \quad (I6)$$

$$G = \frac{h_1}{G_2}; \quad C = \frac{\mu_0}{\mu_2} \text{ (при } g_1^2 > 4g_2); \quad C_1 = -\frac{\nu_2}{\mu_2} \text{ (при } g_1^2 < 4g_2)$$

Здесь $\alpha, \alpha_0 (\alpha \geq \alpha_0)$ - вещественные, $\alpha \pm j\beta$ - комплексные корни уравнения

$$p^2 + Xp + Y = 0, \quad (I7)$$

где

$$X = g_1 + d_1 k; \quad Y = g_2 + d_2 k. \quad (I8)$$

Параметры μ_0, μ_2, ν_2 , входящие в выражения (I6), определяются как корни или составляющие корней уравнения

$$p^2 + g_1 p + g_2 = 0, \quad (I9)$$

при этом $\mu_2, \mu_0 (\mu_2 \geq \mu_0)$ - вещественные, а $\mu_2 \pm j\nu_2$ - комплексные корни.

Для удобства исследования параметры A_2, A_1, C, C_1 заменены эквивалентными им параметрами

$$a = \frac{d_1 k}{g_1}; \quad b = \frac{d_2 k}{g_1^2}; \quad c = \frac{g_2}{g_1^2}. \quad (20)$$

Параметры (20) могут быть выражены через параметры A_2, A_1, C, C_1 . Плоскости вскрывающих сечений в пространстве параметров a, b, c, G разбиты на области, соответствующие различной фазовой картине движений исследуемой системы регулирования давления. При этом определен участок границы между областями абсолютной устойчивости и жесткого режима возбуждения автоколебаний. Полученные результаты разбиения вскрывающих

сечений пересчитаны на пространство параметров $\delta k, \delta_1 k, G$.

Каноническая переменная $x_j (j \neq 1, s)$, как функция времени при $Re \lambda_j, (j \neq 1, s)$, ведет себя согласно канонической системы, рассматриваемой в условиях сечения $G_2^{(1, s)}$ (I2), аналогично координате $y(t)$. Это обстоятельство позволяет в рассматриваемом случае исследовать полностью фазовое пространство системы (3) с нелинейной функцией (4).

Неособое линейное преобразование переменных (I0) позволяет перенести результат исследования канонической системы (I2) на исходную систему (3), рассматриваемую в условиях того же вскрывающего сечения $G_2^{(1, s)}$ ($s=2,3$).

Важной особенностью метода сечений пространства параметров является то, что позволяет исследовать динамическое поведение некоторого класса нелинейных систем, движение которых описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, к которым, как известно, неприменим метод точечных преобразований. В условиях вскрывающих сечений метод пространства параметров позволяет изучить все фазовое пространство системы. Этот метод позволяет производить разбиение плоскостей вскрывающих сечений на области различного динамического поведения исследуемой системы. Несмотря на то, что при исследовании коэффициенты $a_{k\alpha}, b_k$ системы (3) предполагаются фиксированными, они заданы в буквенном виде. Это обстоятельство позволяет исследовать динамическое поведение системы (3) для широкого диапазона изменения этих коэффициентов.

В результате проведенного исследования программной системы регулирования давления воздуха разработана расчетная методика, позволяющая решать вопросы ее динамического поведения при учете ранее неучитывавшихся нелинейностей: сухое трение в измерительном элементе и мертвая зона характеристики сервомотора. Впервые в пространстве настроечных параметров системы выделены области абсолютной устойчивости и автоколебаний жесткого режима возбуждения.

Результаты исследования позволяют судить о влиянии сухого трения в измерителе и мертвой зоны характеристики сервомотора регулятора на динамические свойства системы регулирования.

Мертвая зона характеристики сервомотора положительно влияет на устойчивость системы регулирования, так как увели-

чивает зону притяжения положения равновесия при положительном коэффициенте саморегулирования объекта регулирования.

Сухое трение в измерительном элементе регулятора весьма отрицательно влияет на устойчивость процесса регулирования давления воздуха судового котла. Увеличение интенсивности сил сухого трения уменьшает область абсолютной устойчивости за счет области автоколебаний жесткого режима возбуждения.

Возможность распространения результатов, полученных в сечениях пространства параметров, на их окрестности проверялась моделированием исследуемой системы на аналоговой электронной вычислительной машине ЭМУ-10.

Моделирование системы на ЭВМ позволяет сделать вывод о том, что области различного динамического поведения, выделенные в плоскостях вскрывающих сечений могут быть распространены на небольшие окрестности этих сечений.

Результаты исследования показывают, что влияние учтенных нелинейностей статических характеристик звеньев системы на ее динамическое поведение значительно и их учет при проектировании и настройке системы действительно необходим. Разработанная расчетная методика позволяет решать вопросы динамического поведения системы с минимумом вычислений, пользуясь графиками и простыми формулами.

Возможность уточненного расчета программной системы регулирования при учете существенных нелинейностей характеристик ее звеньев позволяет выбирать рациональные значения настроечных параметров системы. Это особенно важно для тех параметров, для которых необходимо применять метод компромиссной настройки. Например, увеличение динамического коэффициента неравномерности регулирования давления воздуха $- \delta$ увеличивает запас устойчивости системы, но отрицательно влияет на динамическую точность процесса регулирования и выбор оптимального значения этого коэффициента возможен только на основе уточненного расчета системы при учете влияния нелинейностей ее звеньев.

Разработанная расчетная методика предоставляет определенные возможности для выбора значений параметров системы на стадии проектирования, что может привести к сокращению времени, необходимого для ее доработки, наладки и сдачи.

В третьей главе реферируемой работы исследуются вынужденные движения программной гидравлической системы регулирова-

ния давления воздуха судового котла.

Практическое значение изучения вынужденных движений программной системы определяется тем, что характер этих движений определяет область пространства параметров системы регулирования, соответствующую бездымной работе котельной установки. Это в большой степени влияет на величину дополнительного "запаса по воздуху", предусматриваемого при настройке системы для компенсации возникающего в динамике рассогласования между требуемым и действительно поддерживаемым системой давлением воздуха. Величина же этого запаса, как отмечалось, существенно влияет на среднеэксплуатационную экономичность судовой котельной установки.

Задача изучения вынужденных движений нелинейных математических моделей программной системы регулирования давления воздуха точными методами является чрезвычайно сложной и многообразной. Трудности решения этой задачи в большой степени определяются несоблюдением для нелинейных систем дифференциальных уравнений принципа наложения решений (суперпозиция); поэтому в общем случае нельзя складывать частные решения, получаемые при различных внешних воздействиях, а также нельзя складывать решения, описывающие свободные и вынужденные движения изучаемой системы. Задача нахождения этих решений для нелинейной модели, со своей стороны, также предполагает преодоление значительных трудностей вычислительного, а иногда и принципиального характера.

Структурная нелинейность, какой является "выключение" гибкой обратной связи в составе применяемой структуры программной системы регулирования давления воздуха, является дополнительным обстоятельством, затрудняющим задачу изучения вынужденных движений этой системы.

В представленной работе вынужденные движения программной гидравлической системы регулирования давления воздуха исследуются на аналоговой электронной вычислительной машине ЭМУ-10.

Несмотря на сравнительно высокую эффективность электронных моделирующих машин, задача исследования вынужденных движений программной системы регулирования давления воздуха в полном ее объеме все же не может быть практически решена в силу значительного числа варьируемых параметров принятой для исследования математической модели реальной системы. Последнее обстоятельство не только требует большого числа вычисле-

ний, но и затрудняет практическое использование полученных результатов, связанных с многомерным пространством этих параметров.

Задача выбора наиболее рациональной структуры программной системы регулирования давления воздуха является важной и ее решение мыслится как результат изучения динамических свойств системы на нелинейных математических моделях с обеспечением высокой точности поддержания требуемого соотношения топливо-воздух не только для установившихся режимов работы, но и при маневрировании во всем диапазоне рабочих нагрузок котла. Вместе с тем, применяемая в настоящее время структура системы регулирования давления воздуха разработана на основе изучения свойств линейной модели системы и на основе качественного анализа влияния нелинейностей звеньев системы и качественного анализа влияния выключающейся гибкой обратной связи на динамическую и статическую точность поддержания требуемого коэффициента избытка воздуха судового котла. Несмотря на то, что программная система регулирования давления воздуха позволяет получать удовлетворительную точность поддержания коэффициента избытка воздуха в статике, требование повышения динамической точности регулирования подачи воздуха предполагает изучение свойств нелинейных моделей изучаемой системы, достаточно полно учитывающих влияние существенных нелинейностей звеньев системы и особенности работы выключающейся гибкой обратной связи.

Электронное моделирование вынужденных движений исследуемой системы в полном ее структурном объеме с учетом большого числа факторов, влияющих на ее динамические свойства, позволяет получить если и не полную, то все же необходимую информацию, позволяющую судить об уровне совершенства структуры программной гидравлической системы регулирования давления воздуха.

Электронная модель вынужденных движений программной системы регулирования давления воздуха построена на основе следующей системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_{\kappa} \frac{d\varphi}{dt} + \delta_u \varphi + \delta \mu_i + \delta d_2 \tilde{g}_i(t) &= \delta_1 \varphi - \frac{\varepsilon}{2} (\text{sign } \frac{d\varphi}{dt}) - d_1 \mu_r(t) \\ \varphi = \text{const.} \text{ при } \left| T_{\kappa} \frac{d\varphi}{dt} + \delta_u \varphi + \delta \mu_i + \delta d_2 \tilde{g}_i(t) - \delta_1 \varphi + d_1 \mu_r(t) \right| &\leq \frac{\varepsilon}{2}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} T_2 \frac{d\mu_i}{dt} + \tau \mu_i &= -\beta_i T_i \frac{d\mu}{dt} - \frac{\varepsilon_1}{2} (\text{sign } \frac{d\mu_i}{dt}) \text{ при } |\mu_i| < 1 \text{ и } \frac{d\mu_i}{dt} \neq 0, \\ \mu_i = \text{const.} \text{ при } \left| T_2 \frac{d\mu_i}{dt} + \tau \mu_i + \beta_i T_i \frac{d\mu}{dt} \right| &\leq \frac{\varepsilon_1}{2} \text{ и } |\mu_i| = 1; \\ T_s \frac{d\mu}{dt} + \tau \mu - \tau_1 \mu_i &= -f_1(\varphi) + \frac{\varepsilon_2}{2} (\text{sign } \varphi) \text{ при } \varphi \neq 0, \\ \mu = \text{const.} \text{ при } \left| T_s \frac{d\mu}{dt} + \tau \mu - \tau_1 \mu_i + f_1(\varphi) \right| &\leq \frac{\varepsilon_2}{2}; \\ T_a \frac{d\varphi}{dt} + z \varphi &= \mu, \end{aligned} \right\} (21)$$

которая является частным случаем системы (1) с нелинейной функцией (2) при предположениях

$$T_2 = T_0 = T_{s1} = 0, \quad F(t) = 0. \quad (22)$$

Вынужденные движения программной системы регулирования давления воздуха судового котла исследовались на электронной модели для случая перемещения регулирующего органа регулятора давления пара судового котла в сторону увеличения нагрузки на котел. Этот случай вызывает наибольший практический интерес, так как дымление котлов, подача воздуха в топках которых регулируется программной системой регулирования давления воздуха, чаще всего возможно при маневрах на наброс нагрузки.

Построенная электронная модель системы регулирования учитывает влияние следующих нелинейностей ее звеньев: сухое трение в основном измерительном элементе, в исполнительном устройстве, натяжение нулевой пружины изодрома, мертвая зона и насыщение характеристики сервомотора и структурные нелинейности, обусловленные особенностью работы выключающейся гибкой обратной связи.

При моделировании вынужденных движений системы (21) программное задающее воздействие $\mu_r(t)$ представляется аппроксимирующей функцией вида

$$\mu_r(t) = \begin{cases} \kappa_s t - \kappa_s t_0 & \text{при } t > 0 \text{ и } t_0 \leq t \leq t_1; \\ \kappa_s t_1 - \kappa_s t_0 & \text{при } t > 0 \text{ и } t \geq t_1; \\ 0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_0, \end{cases} \quad (23)$$

где κ_0, t_0, t_1 - постоянные.

Дополнительное импульсное воздействие на систему регулирования, развиваемое "ускорителем по воздуху" и пропорциональное перепаду давлений рабочей жидкости на дроссельный клапан регулятора давления пара - $\tilde{q}_1(t)$ представлено функцией вида

$$\tilde{q}_1(t) = \begin{cases} c_d & \text{при } 0 \leq t \leq t_2; \\ c_d \exp[-\lambda_0(t-t_2)] & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3; \\ 0 & \text{при } t \geq t_3 > 0, \end{cases} \quad (24)$$

где c_d, t_2, λ_0, t_3 - постоянные.

При исследовании вынужденных движений системы регулирования предполагается, что значения параметров c_d, t_2, λ_0, t_3 фиксированы, а изменение интенсивности воздействия (24) учитывается масштабным коэффициентом d_2 . Это предположение достаточно точно отражает характер работы дополнительного измерительного элемента, формирующего воздействие $\tilde{q}_1(t)$.

Особенности работы гибкой обратной связи моделируются релейной схемой, переключающей коэффициенты уравнения движения изодрома при выходе мембраны изодрома на упор и открытие пружинного клапана, смонтированного в мембране изодрома. При этом предполагается, что время срабатывания клапана несоизмеримо мало по отношению к времени, за которое мембрана находится на упоре.

При построении электронной модели вынужденных движений исследуемой системы предполагается, что программное воздействие $\mu_r(t)$ и дополнительное импульсное воздействие $\tilde{q}_1(t)$, развиваемое "ускорителем по воздуху", прикладываются к программной системе регулирования давления воздуха в разные моменты времени. Это обстоятельство учитывается постоянной - t_0 сек.

При моделировании исследовалось влияние следующих факторов на работу программной системы регулирования давления воздуха судового котла: быстродействия сервомотора - T_s сек., времени изодрома - T_i сек., интенсивности действия программного задающего воздействия - $\mu_r(t)$, интенсивности действия дополнительного импульсного воздействия $\tilde{q}_1(t)$, величины динамического коэффициента неравномерности регулирования давления воздуха - δ , интенсивности действия сил сухого

трения в основном измерительном элементе - $\frac{\xi}{2}$ и в исполнительном устройстве - $\frac{\xi_2}{2}$, натяжения нулевой пружины изодрома и сухого трения в рычажной системе гибкой связи $\frac{\xi_1}{2}$. Исследовалось также влияние насыщения характеристики сервомотора и параметра, учитывающего интенсивность пружинной нагрузки на сервомотор - τ , на характер вынужденных движений в системе.

Полученные при моделировании вынужденных движений системы регулирования результаты представлены в виде графических зависимостей времени установления нового статического режима - t_p сек. и максимального относительного отклонения регулируемой величины - $\Delta\varphi^{max}$ от параметров, характеризующих интенсивность действия ранее перечисленных факторов, влияющих на качество вынужденных движений исследуемой системы.

В приложении к диссертационной работе приведена часть осциллограмм, полученных при исследовании вынужденных движений программной системы регулирования давления воздуха судового котла на электронной моделирующей установке.

ВЫВОДЫ

В реферируемой работе выполнены следующие исследования, направленные на изыскание средств повышения точности процесса регулирования давления воздуха судового парового котла с помощью программной гидравлической системы регулирования.

1. Исследовано влияние сил сухого трения в основном измерительном элементе и мертвой зоны характеристики сервомотора изодромного регулятора на динамическое поведение программной системы регулирования давления. Сухое трение в измерительном элементе регулятора вредно влияет на устойчивость процесса регулирования и может выводить систему на автоколебательные режимы работы, недопустимые с точки зрения экономической и бездымной работы судового котла.

2. Выделены области, соответствующие различному динамическому поведению системы регулирования в пространстве ее настроечных параметров. Для области абсолютной устойчивости системы получены формулы, позволяющие строить переходные процессы в системе. Возможность распространения результатов разбиения плоскостей вскрывающих сечений второго рода на обла-

сти, соответствующие различным фазовым картинам движений, проверялась на электронной моделирующей установке. Результаты, полученные в сечениях могут быть распространены на небольшую сферность этих сечений.

3. Изучалось влияние сил сухого трения в измерительном элементе и в рычажной системе исполнительного устройства программного регулятора на устойчивость и точность вынужденных движений системы регулирования. Сухое трение вредно влияет на точность поддержания соотношения "топливо-воздух" и может приводить к дымлению котла при маневрировании.

4. Дополнительное импульсное воздействие $\tilde{q}_1(t)$ развиваемое "ускорителем по воздуху", является весьма эффективным средством, повышающим точность процесса регулирования давления воздуха судового котла. Эффективность действия этого воздействия определяется нелинейностями звеньев и принятыми численными значениями настроечных параметров системы. Это обстоятельство затрудняет настройку дополнительного измерительного элемента, формирующего воздействие $\tilde{q}_1(t)$.

5. Уменьшение динамического коэффициента неравномерности регулирования δ является радикальным средством повышения динамической точности регулирования давления воздуха при неизменной структуре программной гидравлической системы. При этом, когда объект регулирования обладает достаточным коэффициентом саморегулирования, при настройке системы необходимо стремиться к возможно меньшему его значению. При достаточно устойчивом объекте регулирования целесообразно строить систему регулирования давления воздуха без обратной связи.

6. Увеличение пружинной нагрузки на сервомотор и уменьшение относительного отклонения отражательной пластинки усилительного реле, при котором происходит ограничение скорости гидравлического сервомотора, уменьшает колебательность вынужденных движений системы регулирования, но, при этом, процесс маневрирования котельной установкой затягивается во времени. Это обстоятельство связано с уменьшением средней за маневр скорости сервомотора.

7. Натяжение нулевой пружины мембранного изодрома и сухое трение в рычажной системе "выключающей" гибкой обратной связи системы регулирования влияют на динамическую точность поддержания соотношения "топливо-воздух". Рациональное значение параметра $\frac{\epsilon_1}{2}$ зависит от численных значений на-

строечных параметров системы и параметров, учитывающих влияние остальных нелинейностей.

8. Постоянная времени изодрома T_i сек. существенно влияет на динамическую точность процесса регулирования. При определенном уровне интенсивности действия существенных нелинейностей звеньев системы регулирования давления воздуха существует какое-то наиболее рациональное значение T_i , при отклонении от которого, качество процесса регулирования ухудшается.

9. Средства повышения динамической точности программной системы регулирования давления воздуха в большой степени лимитируются применяемой структурой этой системы и задача повышения точности поддержания требуемого соотношения "топливо-воздух", в определенном смысле, может рассматриваться как задача проектирования системы с достаточно близкими к линейным статическими характеристиками ее звеньев.

Главным результатом реферируемой работы следует считать создание расчетной методики, позволяющей решать вопросы динамического поведения программной системы регулирования давления воздуха при учете сухого трения в основном измерительном элементе и мертвой зоны характеристики сервомотора и построение электронной модели вынужденных движений этой системы при учете всех существенных нелинейностей ее звеньев.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на заседании секции судовой автоматики научно-технического общества судостроительной промышленности им. академика А.Н. Крылова в июне 1970 г. и опубликованы в статье "Исследование контура регулирования давления воздуха корабельного котла методом сечений пространства параметров", Сборник Трудов Лен. ВВМИУ, вып.34, Л., 1970.