

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 656.621.073.28.679

doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.01

Вильдяева Л.Н., Панов С.Л., Чередник В.Н., Макаров А.М.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ РЕГУЛИРОВАНИЯ КОТЛА ПО ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ

В статье рассматривается задача автоматизированного расчета минимального времени регулирования парового котла по переходной функции с целью поддержания уровня воды в заданных пределах при любых условиях эксплуатации, что является основным требованием надежности в условиях мореплавания судна, а также минимизировать человеческий фактор при управлении судовыми энергетическими установками. Объектом регулирования является паровой вспомогательный котел. Динамические свойства котла как объекта регулирования уровня воды характеризуются переходной функцией, ординаты которой – уровень воды в котле, последовательно зафиксированные через промежутки времени.

В статье приведен алгоритм решения обыкновенного дифференциального уравнения третьего порядка, которое характеризует затухающие амплитудные колебания, что представляют собой типовое колебательное звено систем автоматического регулирования (АСР) и соответственно может быть применен для автоматизации других судовых энергетических установок.

Ключевые слова: автоматизация судовых энергетических установок, автоматизированные системы регулирования, техническая эксплуатация судов, паровой котел, дифференциальное уравнение, колебательное звено, типовое звено систем автоматического управления.

Анализ современного состояния проблемы. При маневрах уровень воды в котле может изменяться быстро и в недопустимых пределах, что может явиться причиной аварии в результате заброса воды в пароперегреватель, турбину или нарушения циркуляции в котле. Поэтому поддержание уровня в заданных пределах при любых условиях эксплуатации является основным требованием надежности.

Постановка проблемы. При ступенчатом изменении нагрузки изменения подвода топлива к котлу отражает переходный процесс, который показывает действительное изменение уровня. После нанесения возмущения уровень будет непрерывно изменяться. Автоматизировать расчет параметров котла с целью обеспечения безопасного уровня при изменении подвода топлива в заданных пределах есть актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Судовая энергетическая установка, паротурбинная, газотурбинная либо дизельная, включает в себя большое количество взаимосвязанных агрегатов и механизмов, устройств и систем с большим количеством регулируемых величин. Многие современные энергетические установки характеризуются быстрыми изменениями величин, определяющих протекание рабочих процессов, при которых оператор в силу своих ограниченных физиологических возможностей не в состоянии следить за их изменением. В связи с этим для

нормальной эксплуатации современных энергетических установок они должны быть оборудованы средствами автоматического регулирования, сигнализации и защиты.

Цель статьи. Разработать алгоритм автоматизированной системы регулирования, которая настраивается путем изменения коэффициента усиления регулятора K_p на переходный процесс с минимальным временем регулирования и динамической ошибкой (отклонением) Ψ_d не более 40%.

Изложение основного материала. Уравнение динамики котла как объекта регулирования уровня φ_1 можно получить, используя его функциональную схему (рис. 1).

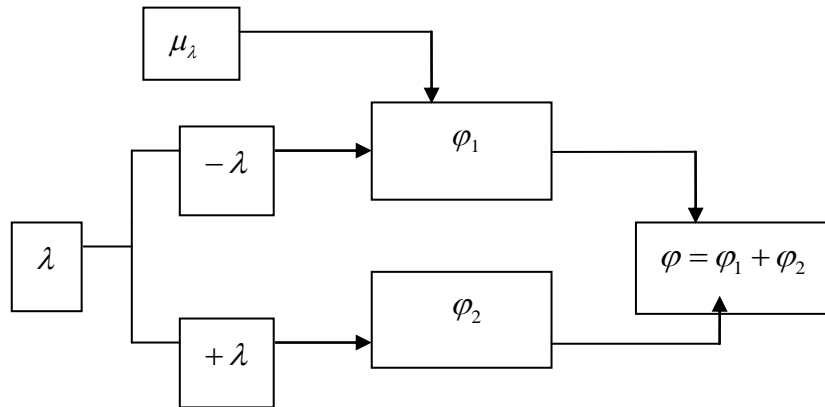


Рисунок 1 – Функциональная схема котла как объекта регулирования уровня воды

$$\varphi_1 = \frac{1}{Ta \cdot T} (\mu_\lambda - \lambda); \quad \varphi_2 = \frac{K_\lambda}{Tar \cdot T + 1} \cdot \lambda; \quad \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{1}{Ta \cdot T} (\mu_\lambda - \lambda) + \frac{K_\lambda}{Tar \cdot T + 1} \cdot \lambda, \quad (1)$$

где φ - относительное изменение уровня;

Ta – время разгона котла по уровню вследствие небаланса «расход пара — поступление питательной воды»;

Tar – постоянная времени котла по изменению уровня вследствие явления "набухания";

T – постоянная времени;

λ – относительное изменение нагрузки (расхода пара), возмущающее воздействие;

K_λ – коэффициент усиления по возмущающему воздействию.

$$\mu_\lambda = -\frac{\varphi}{Tar + Dp} = \Delta m / m_{\max}; \quad \Delta m = m_{\max} - m, \text{ где } m \text{ и } m_{\max} \text{ соответственно текущее}$$

значение и максимальная величина перемещения поршня исполнительного механизма, мм;

Dp – коэффициент неравномерности, $0 \leq Dp \leq 0,1$.

Дифференциальное уравнение динамики АСР третьего порядка имеет вид:

$$(F^{(3)} + A_2 F^{(2)} + A_1 F^{(1)} + A_0) \varphi = (B_2 F^{(2)} + B_1 F^{(1)} + B_0) \lambda. \quad (2)$$

Начальные условия: $\varphi(0) = 0$; $\varphi'(0) = B_2(-\lambda)$; $\varphi''(0) = B_1(-\lambda) + A_2 B_2 \lambda$,

где: $F = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$; $\varphi = \frac{dH}{H_0}$; ∂t – интервал времени (сек); H - уровень воды в котле (мм)

Коэффициенты дифференциального уравнения:

$$A2 = \frac{T_{ap} + T \cdot Dp}{T_{ap} \cdot T}; \quad A1 = \frac{Ta \cdot Dp + T}{T_{ap} \cdot Ta \cdot T}; \quad A0 = \frac{1}{T_{ap} \cdot Ta \cdot T};$$

$$B2 = \frac{Ta \cdot K_{\lambda} - T}{Ta \cdot T}; \quad B1 = \frac{T \cdot Dp \cdot K_{\lambda} - Dp \cdot T - T_{ap}}{T_{ap} \cdot Ta \cdot T} + A2; \quad B0 = \frac{-Dp}{T_{ap} \cdot Ta \cdot T},$$
(3)

где: для конкретного примера скачкообразное изменение пара $\lambda = 20 \%$;

$K_{\lambda} = \frac{F2_{max}}{(\lambda \cdot 100)}$ – коэффициент усиления по возмущающему воздействию (см. рис. 2);

$T_{ap} = 0.02 \cdot Tc$, где $Tc = 10c$ время сервомотора.

Сервомотор – поршневой, прямодействующий, в динамическом отношении является интегрирующим, нейтральным звеном с минимальным временем сервомотора $Tc = 5c$. Жесткая обратная связь кинематического типа;

T – постоянная времени, $T = 0,5(T_{MIN} + T_{MAX})$ (см. рис. 2);

Ta – время разгона котла по уровню вследствие небаланса (см. рис. 2).

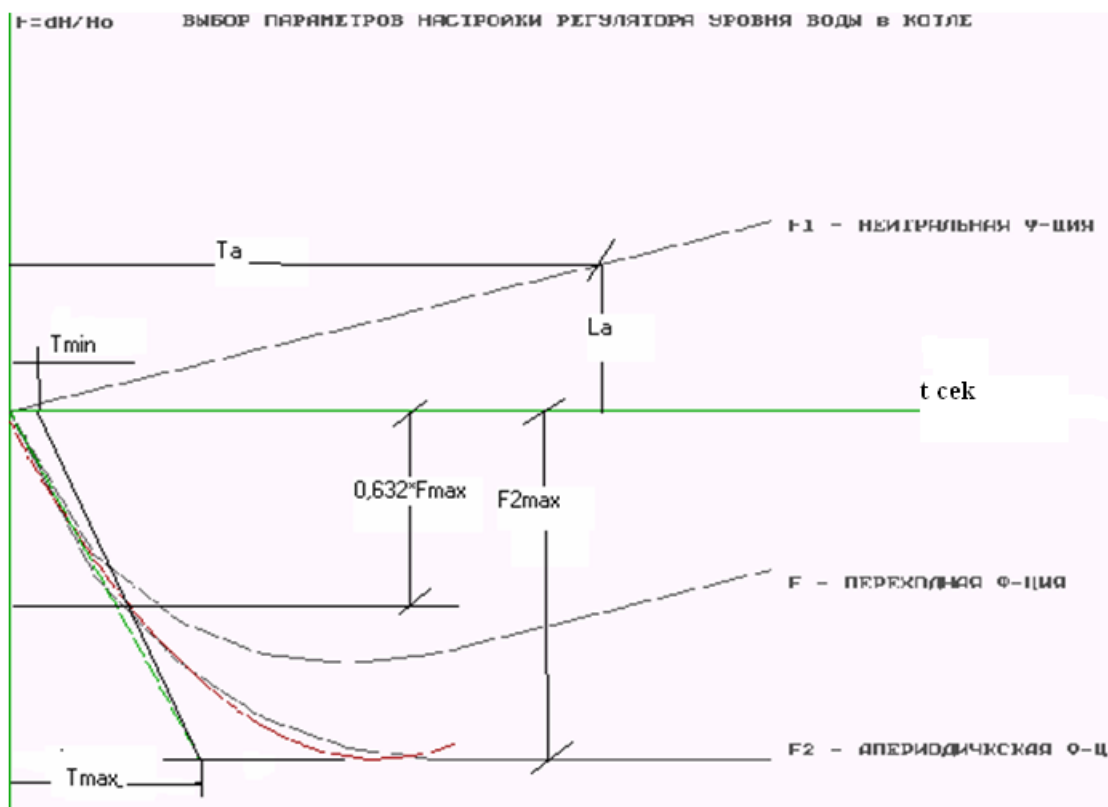


Рисунок 2 – Определение параметров настройки регулятора уровня воды в котле

определения T и Ta необходимо определить параметры функций:

1. Переходной $F = \frac{H_i - H_0}{H_0};$

2. Нейтральной Угловой коэффициент $K = \frac{H_9 - H_8}{t_9 - t_8}; F_1 = K \cdot T; K = 0,0014;$

3. Апериодической $F_2 = -||F| + |F_1||$;
4. Аппроксимируем 6 точек апериодической функции параболой $F = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$ методом наименьших квадратов. $a = 0,000236$; $b = -0,01031$; $c = -0,00354$;
5. Угловой коэффициент касательной к параболе $K_{II} = 2ax + b$, в точке $T(0,0)$ $K_{II} = b$. Уравнение касательной будет $F = K_{II} \cdot t$; $K_{II} = -0,01031$.
6. $T_{\max} = \frac{F_2}{K_{II}} = \frac{0,116}{0,01031} = 11,256$ сек.
7. Чтобы определить T_{\min} необходимо определить вспомогательную точку пересечения прямой $y = 0,632F_{\max}$ и параболой $F = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$ т.е. $0,632F_{\max} = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$, и получим $a \cdot t^2 + b \cdot t + (c - 0,632F_{\max}) = 0$. $T_{\min} = 3,44967$ с.
Постоянная времени $T = 7,35317$ с.
8. Время разгона котла по уровню вследствие небаланса $T_a = 142,85714$ с т.е. точка пересечения двух прямых $T_a = \frac{\lambda \cdot 0,01}{K} = \frac{0,2}{0,0014} 142,66$ с.
Коэффициент усиления по возмущающему воздействию $K_{\lambda} = \frac{F_2 \max}{(\lambda \cdot 100)} = \frac{0,116}{0,2} = 0,58$.

Расчет параметров, необходимых для определения коэффициентов дифференциального уравнения (2) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчет параметров

Наименование Величины	Время от момента нанесения возмущения T (с)									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Уровень воды H_T (мм)	100 H_0	952 H_1	930 H_2	919 H_3	916 H_4	919 H_5	926 H_6	933 H_7	940 H_8	947 H_9
Переходная функция F	0	- 0,04 8	- -0,07	- 0,08 1	- 0,084 0	- 0,08 1	- 0,07 4	- 0,06 7	- -0,06	- 0,05 3
Нейтральная F_1	0	0,00 7	0,01 4	0,02 1	0,028	0,03 5	0,04 2	0,04 9	0,05 6	0,06 3
Апериодическа я F_2	0	- 0,05 5	- 0,08 4	- 0,10 2	-0,116	0,11 6	0,11 6	0,11 6	0,11 6	0,11 6

Коэффициенты дифференциальных уравнений, рассчитанных по вышеприведенным формулам (3) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты дифференциальных уравнений

D_p	A_2	A_1	A_0	B_2	B_1	B_0
0,00	0,135996	0,035000	0,004759	0,071877	0,135044	0,00000
0,02	0,235996	0,048599	0,004759	0,071877	0,234749	-0,000095
0,04	0,335995	0,062199	0,004759	0,071877	0,334456	-0,000190
0,06	0,435995	0,075798	0,004759	0,071877	0,434162	-0,000286
0,08	0,535995	0,089398	0,004759	0,071877	0,533868	-0,000381
0,1	0,6359957	0,102998	0,004759	0,071877	0,633574	-0,000381

Для решения дифференциального уравнения динамики АСР методом Рунге-Кутты необходимо сделать преобразование, после которого уравнение (2) примет вид:

$$dy_3 = B_0 - A_2 dy_2 - A_1 dy_1 - A_0 y, \tag{4}$$

где $dy_3 = F^{(3)}$; $dy_2 = F^{(2)}$; $dy_1 = F^{(1)}$; $y = F$.

Начальные условия:

$$y(0) = 0; \quad dy_1(0) = B_2(-\lambda); \quad dy_2(0) = B_1(-\lambda) + A_2 B_2 \lambda. \tag{5}$$

Реализация точки функции пошаговая с интервалом по времени $\Delta t = 1$, интервал по времени соответствует $0 \leq t \leq 80$.

Алгоритм решения дифференциального уравнения (2) для определения минимального времени регулирования по переходной функции при возмущении λ и нулевых начальных условиях (5) с фиксированным временем сервомотора $T_c = 10$ с представлен на рис.3.

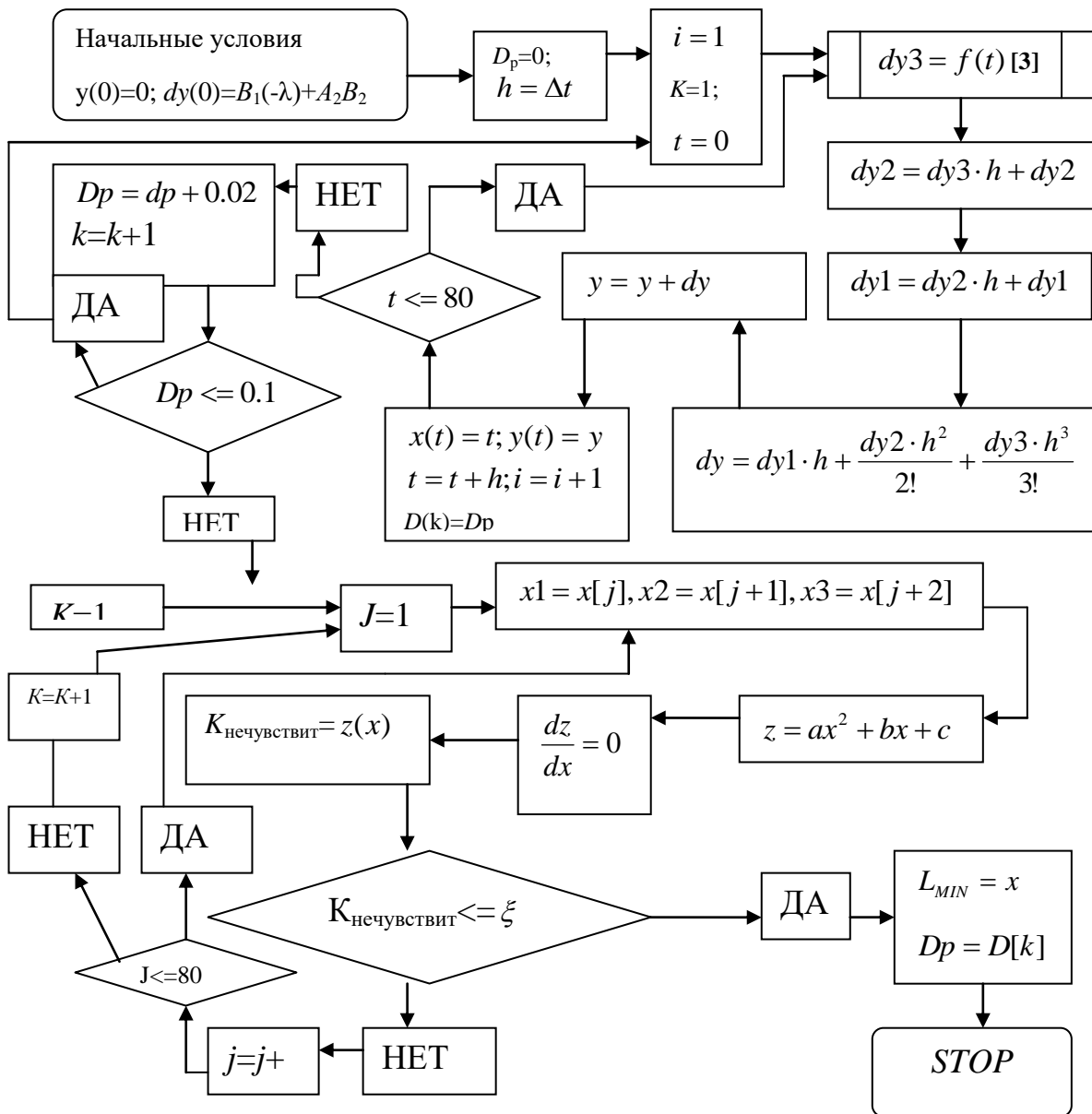


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму решения дифференциального уравнения (2)

Графическая интерпретация вычислительного процесса представлена на рис. 4, рис. 5. Соответствие каждой кривой в диапазоне времени $0 \leq t \leq 80$ с коэффициентом неравномерности Dp реализовано по цветовому признаку $-1 < F < +1$

Результатом решения дифференциального уравнения (2) есть характеристика переходного процесса. По полученной характеристике переходного процесса определяются показатели его качества: минимальное время регулирования L_{MIN} , динамическая ошибка $\Psi_D = \frac{F_{MAX}}{\lambda}$ и коэффициент колебательности $\Psi_K = \frac{F_{MIN}}{F_{MAX}}$. Показатели качества переходного процесса вычисляются во время расчета

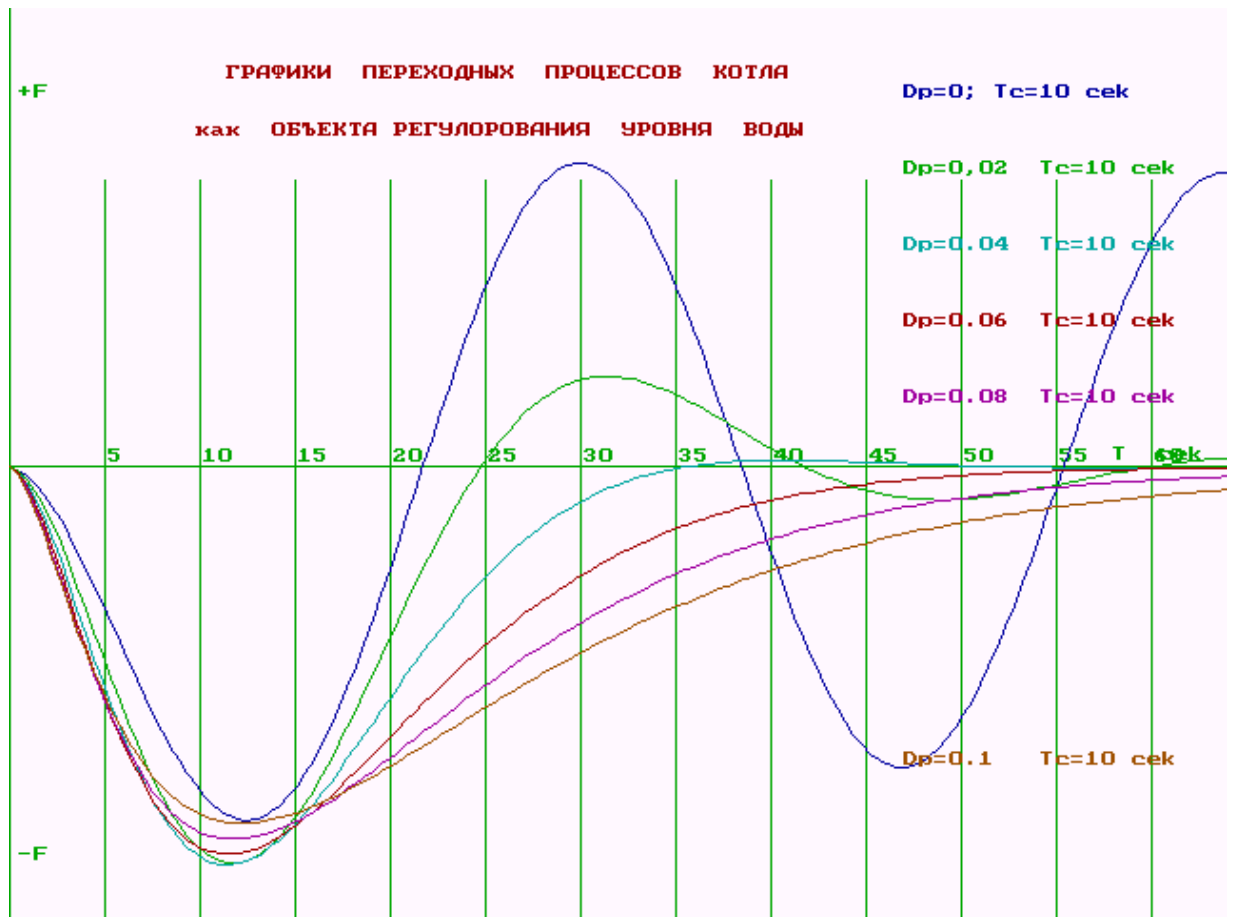


Рисунок 4 – Графики переходных процессов парового котла как объекта регулирования уровня воды

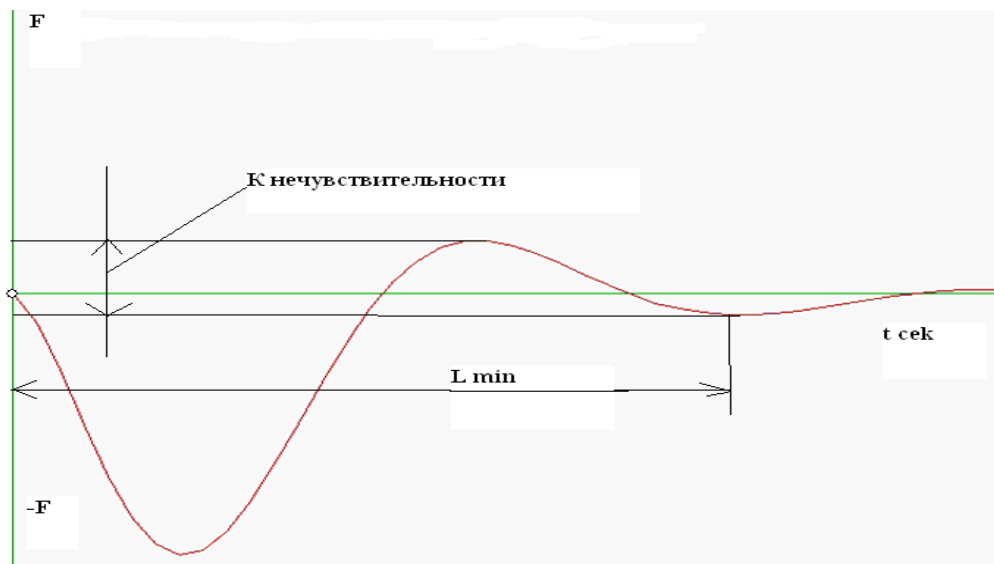


Рисунок 5 – Графическая интерпретация определения коэффициента нечувствительности и минимального времени регулирования парового котла по переходной функции

Рабочий диапазон коэффициента неравномерности $0,03 \leq Dp \leq 0,08$. Процесс продолжается до выполнения условия $K_{\text{нечувствит}} \leq \xi$. В данном случае для времени сервомотора $Tc = 10c$ можно предположить интервал $0,04 < Dp < 0,06$. Динамические характеристики процесса показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Динамические характеристики процесса

Dp	Tc (сек)	L_{MIN} (сек)	Ψ_D	Ψ_K
0	10	75,55	38,91656	0.98
0,02	10	50,84	46,58626	0.65
0,04	10	47,56	41,82381	0.37
0,06	10	51,94	39,94162	0.05
0,08	10	76	45,81577	0.0020
0,1	10	80	44,20858	0.0021

Аналогично рассчитываются показатели качества переходного процесса для времени сервомотора $Tc = 5c$, $Tc = 10c$, $Tc = 15c$ и $Dp = 0,05$. Показатели качества переходных процессов показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели качества переходных процессов

Tc (сек)	$Dp = 0,05$	L_{MIN} (сек)	Ψ_D	Ψ_K
5	0,05	35,5	33,41	0,8467
10	0,05	51,27	39,5	0,3758
15	0,05	45,21	49,4	0,0031

В данном случае параметры настройки регулятора на переходной процесс вспомогательного парового котла будут: время сервомотора в пределах $5 \leq Tc \leq 10c$, минимальное время регулирования $35,5 \leq L_{MIN} \leq 51,27$, коэффициент усиления K_p обратно пропорционален коэффициенту неравномерности $K_p = \frac{1}{Dp} = \frac{1}{0,05} = 20$.

Динамическая ошибка $\Psi_D < 40\%$.

Выводы. Компьютерные технологии позволяют с достаточно высокой точностью определять параметры настройки регулятора на переходной процесс, применяя при этом достаточно простой и надежный алгоритм. Из всего диапазона времени сервомотора $5 \leq T_c \leq 15$ с и диапазона коэффициента неравномерности $0 \leq D_p \leq 0,1$ автоматически выбираются наиболее выгодные параметры работы парового котла в процессе его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л.Л., Кошовий А.А. Автоматизовані комплекси судноводіння // Підручник для морських академій // Київ: КВІЦ. 2001. 292 с.
2. Толшин В.И., Сизых В.А. Автоматизация судовых энергетических установок // Учебник. 3-е изд. Переработанное и дополненное // М.: Транслит. 2006. 353 с.
3. Печененко В.И., Козьминых Г.В. Автоматика регулирования и управления судовых силовых установок // М.: Транспорт. 1973г.
4. Нелепин Р.А. Автоматизация судовых энергетических установок // Л.: Судостроение. 1975г. 532 с.
5. Шиняев Е.Н. Судовые паровые котлы и их эксплуатация // М.: Транспорт. 1979г.
6. Акимов П.П. Судовые автоматизированные энергетические установки // М.: Транспорт. 1980 г.
7. Сыромятников В.Ф., Лубочкин Б.И. Автоматическое регулирование судовых паровых котлов // Л.: Судостроение. 1983г.
8. Архангельский В.С. Судовая автоматика // Л.: Судостроение. 1989г.
9. Сизов В.А. Судовая автоматика и контрольно измерительные приборы // М.: Транспорт. 1979г.
10. Журенко М, А., Таранчук Н.В. Технические средства автоматизации судовых энергетических установок // Л.: Судостроение. 1990г.
11. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: Учебник для вузов // М.: Высш. Шк. 2002. 840с. ISBN 5-06-004020-8.

Вільдяєва Л.М., Панов С.Л., Чередник В.М., Макаров О.М.
АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК МІНІМАЛЬНОГО ЧАСУ
РЕГУЛЮВАННЯ КОТЛА ПО ПЕРЕХІДНИЙ ФУНКЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА
РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ

У статті розглядається задача автоматизованого розрахунку мінімального часу регулювання парового котла по перехідній функції з метою підтримки рівня води в заданих межах при будь-яких умовах експлуатації, що є основною вимогою надійності при експлуатації судна, а також мінімізувати людський фактор при управлінні судновими енергетичними установками. Об'єктом регулювання є паровий допоміжний котел. Динамічні властивості котла як об'єкта регулювання рівня води характеризуються перехідною функцією, ординати якої - рівень води в котлі, послідовно зафіксовані через проміжки часу.

У статті наведено алгоритм вирішення звичайного диференціального рівняння третього порядку, яке характеризує затухаючі амплітудні коливання, що представляють собою типове коливальний ланка систем автоматичного регулювання (АСР) і відповідно може бути застосований для автоматизації інших судових енергетичних установок.

Ключові слова: автоматизація судових енергетичних установок, автоматизовані системи регулювання, технічна експлуатація суден, паровий котел, диференціальне рівняння, коливальний ланка, типове ланка систем автоматичного управління.

Vildyaeva L.N., Panov S.L., Cherednyk V.M., Makarov A.M.
**AUTOMATED CALCULATION OF THE MINIMUM REGULATION TIME
OF THE BOILER BY THE TRANSITION FUNCTION AS AN OBJECT
FOR REGULATING THE WATER LEVEL**

The article discusses the problem of automated calculation of the minimum time for regulating a steam boiler according to the transient function in order to maintain the water level within the specified limits under any operating conditions, which is the main requirement for reliability in the operation of the vessel, as well as to minimize the human factor when controlling ship power plants. The control object is the auxiliary steam boiler. The dynamic properties of the boiler as an object for regulating the water level are characterized by a transition function, the ordinates of which are the water level in the boiler, sequentially fixed at intervals.

The article presents an algorithm for solving an ordinary differential equation of the third order, which characterizes damped amplitude oscillations, which are a typical oscillatory link of automatic control systems (ACP) and, accordingly, can be used to automate other ship power plants.

Key words: *automation of ship power plants, automated control systems, technical operation of ships, steam boiler, differential equation, oscillatory link, typical link of automatic control systems.*