

2. Instruction Manual for boiler plant. — Aalborg Industries, 2005. — Vol. 1, 2: Boiler type 2xMISSION™OL model 25000, Burner type KBSD 1900.

3. Панамарев В. Е. Опыт контроля состава отработавших газов современных судовых дизельных и котельных установок танкеров / В. Е. Панамарев, Н. И. Николаев, Н. Н. Зиненко // Материалы Всерос. межотр. науч.-техн. конф. / С.-Петербург. гос. морской техн. ун-т. — СПб., 2012. — С. 136–140.

4. Пат. 110068 РФ. Система мониторинга энергоэффективности и экологической безопасности судов (S3ES-Novoship). Зарег. 10.11.2011.

5. ГОСТ 17.2.4.06-90. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 16 с.

6. Панамарев В. Е. Контроль состава отработавших газов судовых двигателей и котлов в эксплуатации / В. Е. Панамарев, Н. И. Николаев, Н. Н. Зиненко // XI конф. по судостроению судоходству, деятельности портов, освоению океана и шельфа «Нева-2011», 21–23 сентября 2011 г. — СПб.: Издат.-полиграф. комплекс ЛЕНЭКСПО, 2011.

7. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч. — М.: Гидрометеиздат, 1985.

УДК 517.9

А. Г. Таранин,

доцент,

ФГБОУ ВПО «Государственный
морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ СРЕДСТВАМИ MATLAB

PARAMETRIC PID TUNE OF SHIP DIESEL FREQUENCY COMPENSATORS BY MEANS OF MATLAB PROMPTS

Статья посвящена параметрической настройке регулятора частоты вращения судового дизеля в процессе тренажерной подготовки средствами MATLAB. Для повышения качественных показателей в переходных режимах и упрощения настройки применен ПИД-регулятор. Разработана программа для автоматизации настройки. Приведен пример.

The article is devoted to diesel frequency regulator parametric tuning for training on ship simulator by means of MATLAB. To keep the controller as simple as possible PID-regulator is used for step response rising of quality indicators. For automated tuning the program in codes MATLAB is created. The example is considered.

Ключевые слова: тренажер, судовой дизель, параметрическая настройка, переходный процесс, передаточные функции, ПИД-регулятор.

Key words: simulator, ship diesel, parametric tuning, step response, transfer functions, PID-controller.



ПОВЫШЕНИЕ требований к энергетической эффективности, безопасности и надежности энергетических установок морских и речных судов на базе современных систем автоматизации и управления является важной научно-технической задачей. Процесс оснащения судов сложными техническими средствами и системами, построенными на качественно

новой элементной базе с использованием компьютерных технологий, должен сопровождаться повышением требований к уровню профессиональной подготовки судовых экипажей, приобретением знаний и умений путем применения новых способов подготовки, отработки навыков по эффективному управлению судовой техникой.

Эффективным средством обучения судовых команд являются тренажеры. На тренажерах и программных комплексах на качественно новом уровне решаются задачи моделирования систем, параметрической настройки с максимальным приближением к реальным процессам, приобретаются навыки по управлению техническими средствами согласно правилам эксплуатации, а также отрабатываются алгоритмы по реализации мер, исключающих аварийные ситуации. Тренажеры широко используются для проведения исследовательских работ, связанных с выбором наиболее рациональных технологических режимов и параметрической оптимизации систем управления техническими средствами различного назначения при групповом взаимодействии.

В Государственном морском университете им. адм. Ф. Ф. Ушакова для тренажерной подготовки на русском и английском языках используется тренажер машинного отделения [2]. Наряду с вопросами обслуживания главных двигателей судна и вспомогательных механизмов на тренажере изучаются системы управления, оборудованные типовыми регуляторами с различными принципами управления и структурами, отрабатываются способы их настройки по различным критериям. К ним относятся: система ДАУ ГД; группа автоматизируемых объектов совместно с комплексной системой Auto Chief; регуляторы температуры масла; двухконтурные системы охлаждения ГД; регуляторы параллельной работы вспомогательного и утилизационного котлов, судовых ДГА совместно с утилизационным турбогенератором; автоматизированная система очистки льяльных вод и др. Опыт показывает, что при выполнении процедур параметрической настройки и оптимизации рабочих характеристик судовых систем управления объем имеющейся в тренажерном комплексе информации оказывается недостаточным для глубокого понимания закономерностей поведения систем с обратной связью как в статике, так и в динамике. Практически не приводятся технологии регулирования и настройки электронных регуляторов частоты вращения ГД, не представлены на современном уровне технологии энергосбережения и др. Даже в тех случаях, когда в автоматизированных системах применимы ПИД-регуляторы, для расчета их параметров рекомендуются числовые значения без должного обоснования.

Дальнейшее совершенствование тренажеров может обеспечиваться за счет разработки новых элементов и создания программных тренажерных комплексов, базирующихся на применении вычислительной среды MATLAB/Simulink, пригодных для пополнения инструментария тренажеров машинного отделения [2]. Программная среда MATLAB/Simulink может с успехом использоваться для кардинального совершенствования практически любых отечественных тренажеров, применяемых на водном транспорте. Основное преимущество среды MATLAB/Simulink состоит в возможности создания программных комплексов различного назначения, которые наряду с существующими тренажерными средствами могут использоваться для практической подготовки плавсостава. На ее базе могут быть созданы новые программные комплексы и тренажеры различного назначения для транспортных, пассажирских судов, судов технического флота, плавучих платформ для освоения шельфа и др. При этом разработка новых виртуальных средств обучения не связана с большими материальными затратами, а применение пакета MATLAB гарантирует высокое качество моделирования.

Современные технологии моделирования составляют арсенал эффективных средств решения сложных технических задач на водном транспорте. Моделирование процессов автоматизации и управления динамическими объектами на судах позволяет не только оценить качественные показатели и технические возможности существующих систем, но и определить наиболее простые пути их совершенствования, а также овладеть приемами и технологией целенаправленного выполнения параметрической настройки и выбора эффективных эксплуатационных режимов.

Рассмотрим решение конкретной задачи. Остановимся кратко на анализе и моделировании средствами MATLAB системы автоматического регулирования частоты вращения судового дизе-

ля, а также выполним параметрическую настройку ПИД-регулятора с целью улучшения качества управления. Отметим, что определение параметров настройки ПИД-регулятора, в частности, входит в состав типовых задач тренажера машинного отделения. Цель моделирования состоит в оценке регулировочных свойств системы управления частотой вращения ГД с валогенератором и регулятором типа Вудвард UG-40, а также в синтезе ПИД-регулятора для управления данной системой. Объектом моделирования является дизельная установка с валогенератором одновинтового сухогруза водоизмещением 30 тыс. т с винтом фиксированного шага (ВФШ). Регулятор установлен на судовом дизеле 9 ДКРН 80/160-4. Эффективная мощность дизеля 15 886 кВт, частота вращения на номинальном режиме 122 об/мин. Для моделирования используем модели в форме дифференциальных уравнений, приведенные в работе [1, с. 164–180].

Введем следующие обозначения:

$\omega(t)$ — частота вращения вала ГД, изменяющаяся в функции времени t ;

$h(t)$ — перемещение органа управления частотой вращения дизеля;

$r(t)$ — задающий сигнал;

$M_d(t)$ — момент на валу двигателя;

$P_g(t)$ — мощность валогенератора;

T_a — постоянная времени ГД дизеля с валогенератором, валопроводом и винтом (момент инерции приведен к валу двигателя);

T_i — постоянная времени изодрома регулятора;

T_s — постоянная времени сервомотора;

Z — коэффициент самовыравнивания двигателя (ГД);

K_h — коэффициент передачи ГД (с постоянной времени T_a);

K_c — коэффициент передачи модели, определяющий влияние $M_d(t)$ на $\omega(t)$;

K_{vg} — коэффициент передачи модели валогенератора;

K_g — статический коэффициент регулятора;

K_f — коэффициент изодромной обратной связи регулятора;

K_p — пропорциональная составляющая ПИД-регулятора;

K_i — интегральная составляющая ПИД-регулятора;

K_d — дифференциальная составляющая ПИД-регулятора;

δ — коэффициент неравномерности измерителя регулятора;

J — регулировочный коэффициент.

Уравнения динамики системы регулирования частоты вращения дизельной энергетической установки ГД–ВГ имеют следующий вид [1]:

— модель двигателя:

$$T_a \frac{d\omega(t)}{dt} + Z \cdot \omega(t) = K_h \cdot h(t) - K_c \cdot M_d(t) - K_g \cdot P_g(t);$$

— модель регулятора:

$$T_i \cdot T_s \cdot \delta \cdot \frac{d^2 h(t)}{dt^2} + [T_s \cdot \delta + T_i (K_f \cdot \delta \cdot J + K_g)] \cdot \frac{dh(t)}{dt} + K_g \cdot h(t) = - \left(T_i \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) \right).$$

Приведенные дифференциальные уравнения удобно представить в операторной форме. Для перехода в частотную область введем оператор Лапласа s . Тогда при нулевых начальных условиях соотношения между входными и выходными координатами можно записать в виде алгебраических уравнений:

— для модели двигателя:

$$\omega(s) = dvAl(s) \cdot (K_h \cdot h(s) - K_c \cdot M_d(s) - K_g \cdot P_g(s)); \quad (1)$$

— передаточной функции для модели регулятора:

$$\text{reg}A(s) = \frac{h(s)}{\omega(s)} = \frac{b_1 \cdot s + b_2}{a_1 \cdot s^2 + a_2 s + a_3}, \quad (2)$$

где $a_1 = T_i \cdot T_s \cdot \delta$; $a_2 = T_s \delta + T_i \cdot (K_f \cdot J \cdot \delta + K_g)$; $a_3 = K_g$; $b_1 = T_i$ и $b_2 = 1$.

Передаточная функция — $\text{dv}A1(s) = \frac{1}{T_a \cdot s + Z}$.

Блок-схема системы представлена на рис. 1. Согласно уравнению (1) при составлении модели принята структура с общим множителем $\text{dv}A1(s)$, на вход которой поданы три преобразованных по Лапласу сигнала: управление $h(s)$, возмущения $M_d(s)$ и $P_g(s)$.

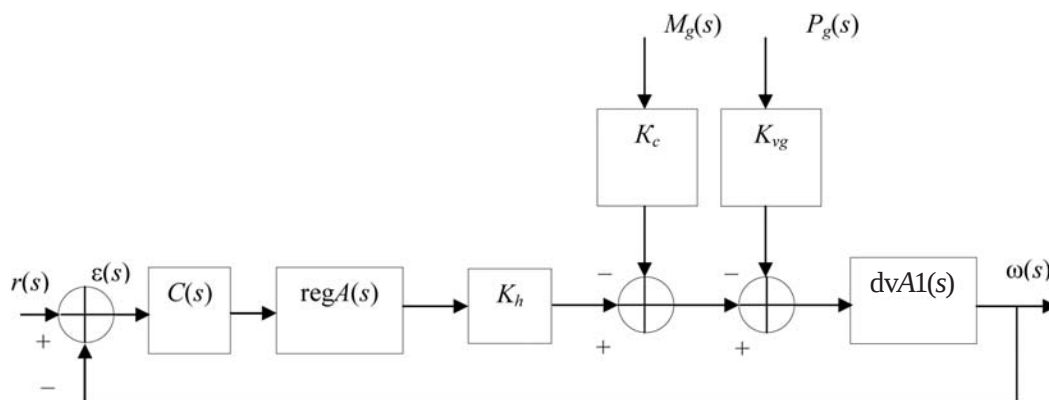


Рис. 1. Блок-схема системы регулирования частоты вращения дизельной энергетической установки ГД–ВГ

Передаточная функция замкнутой системы (рис. 1) при регулировании частоты вращения по отклонению от заданного значения $r(s)$ имеет вид

$$F1(s) = \frac{\omega(s)}{r(s)} = \frac{W1(s)}{1 + W1(s)}, \quad (3)$$

где $W1(s) = C(s) \cdot K_h \cdot \text{reg}A(s) \cdot \text{dv}A1(s)$. Передаточные функции по возмущающим сигналам $M_d(s)$ и $P_g(s)$ соответственно можно записать:

$$F22(s) = \frac{\omega(s)}{M_d(s)} = \frac{K_c \cdot \text{dv}A1(s)}{1 + C(s) \cdot K_h \cdot \text{reg}A(s) \cdot \text{dv}A1(s)}, \quad (4)$$

$$F33(s) = \frac{K_{vg} \cdot \text{dv}A1(s)}{1 + C(s) \cdot K_h \cdot \text{reg}A(s) \cdot \text{dv}A1(s)} \quad (5)$$

Полученные зависимости (3)–(5) применим для моделирования процессов, происходящих в системе в динамических режимах. С этой целью составим файл sah794.m в кодах MATLAB. Сначала исследуем технические возможности повышения регулировочных свойств за счет выбора параметров настройки существующей системы со статическим регулятором Вудвард UG-40 путем их вариации в пределах, определяемых инструкцией. Чтобы в моделировании использовать только существующую систему, исключим влияние на ее динамику ПИД-регулятора, выбрав $K_p = 1$, $K_i = 0$ и $K_d = 0$. Введем численные значения параметров регулятора:

$$T_s = 0,067; J = 2,2; K_g = 0,01; \delta = 0,12; K_f = 0,355; T_i = 0,7.$$

Путем подстановки данных в уравнение (2) получим передаточную функцию регулятора:

$$\text{reg}A(s) = \frac{0,7s + 1}{0,005628s^2 + 0,08064s + 0,01}. \quad (6)$$

Для динамической модели объекта примем следующие расчетные значения:

$$T_a = 1,9; Z = 1,5; K_h = 0,85; K_c = 1,0; K_{vg} = 0,85; K_{\text{reg}} = 1.$$

Их подстановка в формулы (3)–(5) позволяет получить передаточные функции со следующими числовыми значениями:

$$F1(s) = \frac{\omega(s)}{r(s)} = \frac{0,595s + 0,85}{0,01069s^3 + 0,1617s^2 + 0,735s + 0,865}, \quad (7)$$

$$F22(s) = \frac{\omega(s)}{M_d(s)} = \frac{0,005628s^2 + 0,08064s + 0,01}{0,01069s^3 + 0,1617s^2 + 0,735s + 0,865}, \quad (8)$$

$$F33(s) = \frac{\omega(s)}{P_g(s)} = \frac{0,004784s^2 + 0,06855s + 0,0085}{0,01069s^3 + 0,1617s^2 + 0,735s + 0,865}. \quad (9)$$

Теперь можно приступить к тренажерной подготовке по выбору параметров настройки регулятора Вудвард UG-40 (базисного регулятора) с учетом того, что известен диапазон изменения двух из них, определенный паспортными данными:

$$T_i = 0,5 \div 2,5 \text{ с}; K_g = 0,01 \div 0,1.$$

Обычно выбор параметров, обеспечивающих заданные показатели качества в переходном режиме, выполняют путем вариации T_i и K_g с визуальной оценкой реакции на единичный входной сигнал на каждой итерации. При вариации двух параметров такой подход вполне допустим. Однако с увеличением их числа требуются современные технологии и способы принятия решений по параметрической оптимизации технических систем. Кроме того, независимо от числа параметров визуальная оценка не исключает субъективных решений, принимаемых оператором.

Технические средства MATLAB позволяют на качественно новом уровне решать как задачи параметрической оптимизации, так и исследовать широкий спектр проблем по анализу и синтезу систем. Так, например, функция оценки спектра $\text{eig}(\text{Fi}(s))$, примененная к замкнутым системам (7)–(9), позволяет на каждой итерации выбирать решения по корням характеристического уравнения, исходя из требований устойчивости и колебательности. Использование функции $S = \text{stepinfo}(y, t)$ к переменным, возвращенным функцией $\text{step}(\text{sys})$, дает возможность оценки численных значений времени переходного процесса (по достижении значений заданной погрешности — по умолчанию 2 % — от установившегося режима ($Y_{\text{уст}}$)), перерегулирования и времени пикового значения выходной координаты, а также Rise Time времени ее изменения в активной области от $(0,1 \cdot Y_{\text{уст}})$ до значения $(0,9 \cdot Y_{\text{уст}})$.

Для реализации параметрической настройки и построения графиков в процессе тренажерной подготовки составлен файл `sah794.m` в кодах MATLAB, выполняющий функции элемента программного комплекса. Файл снабжен исчерпывающими комментариями для выполнения расчетных операций. Путем вариации параметров в третьей строке файла выполнен выбор наиболее подходящего режима. Ему соответствуют величины: $T_i = 0,7$ с и $K_g = 0,01$.

```
% sah794.m
% Параметры регулятора Вудвард типа UG-40:
Ts=0.067; J=2.2; Kg=0.01; delt=0.12; Kf=0.355; Ti=0.7;
s=tf('s');
a1=Ti*Ts*delt; a2=Ts*delt+Ti*(Kf*J*delt+Kg); a3=Kg;
% Формирование передаточной функции регулятора:
num=[Ti 1]; den=[a1 a2 a3];
```

```
regA=tf(num,den)
% Модель динамики двигателя:
Ta=1.9; Z=1.5; Kh=0.85; Kc=1.0; Kvg=0.85; Kreg=1;
% Передаточная функция дизеля:
den1=[Ta Z];
dvA1=tf(1,den1)
%=====
% Параметры ПИД-регулятора:
%Kp=20;
%Ki=0.3; Kd=1.2;
Kp=1; Ki=0; Kd=0;
C=pid(Kp,Ki,Kd)
% =====
% Передаточная функция разомкнутой системы W1(s)=w(s)/eps(s)
W1=C*Kh*regA*dvA1
% Система с единичной обратной связью F1=w(s)/r(s)=W1(s)/(1+W1(s)):
F1=feedback(W1,1)
% Передаточная функция по возмущению Md(s): F22(s)=w(s)/Md(s)
F2=feedback(dvA1,C*Kh*regA,-1);
F22=Kc*F2
% Передаточная функция по возмущению Pg(s): F33(s)=w(s)/Pg(s)
F3=feedback(dvA1,C*Kh*regA,-1);
F33=Kvg*F3
eig(F1)
%=====
% Графические построения:
subplot(2,2,1:2)
[w,t]=step(F1,3);
stepinfo(w,t)
%[w,t]=step(F1,0.5);
plot(t,w),grid
subplot(2,2,3)
[Md,t]=step(F22,3);
plot(t,Md),grid
%axis([0 0.5 0 0.1])
subplot(2,2,4)
[Pv,t]=step(F33,3);
plot(t,Md),grid
```

На рис. 2 представлены графики переходных процессов в системе регулирования частоты вращения вала дизеля со стандартным оборудованием. Собственные значения системы при качественной настройке параметров: $\lambda_{1,2} = -6.6524 \pm j0.5886$; $\lambda_3 = -1.8137$. Оценка показателей с помощью функции stepinfo:

Время нахождения реакции в активной области (RiseTime): 0.3395с.
Время переходного процесса: 1.7193с.
Нижняя граница (Yуст.): 0.8934.
Верхняя граница (Yуст.): 1.0593.
Перерегулирование в %: 7.5608.
Отклонение от нижней границы (Yуст.): 0.
Максимальная амплитуда (Peak): 1.0593.

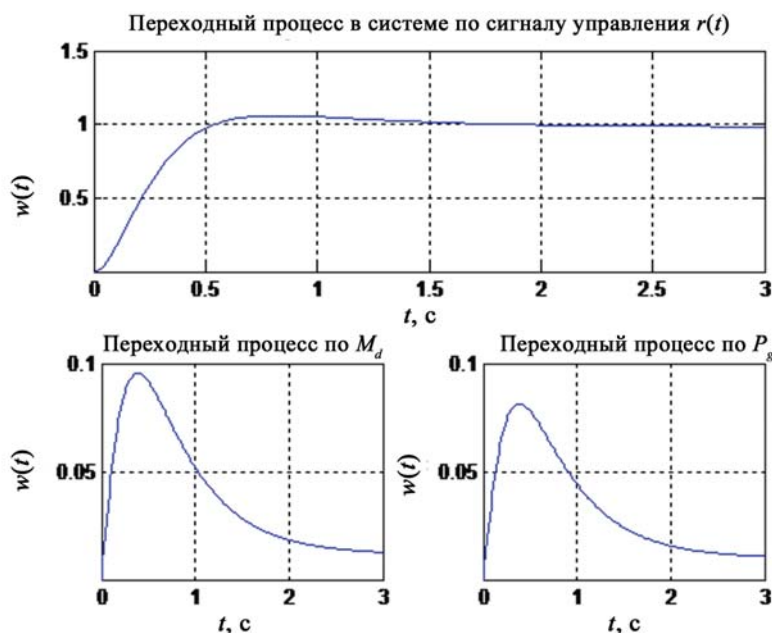


Рис. 2. Переходные процессы в системе с регулятором Вудвард UG-40

Графики переходных процессов по сигналам возмущения, соответствующие передаточным функциям (8) и (9), имеют показатели переходного процесса:

	P_g	M_d
Время переходного процесса	2.4963с	2.4963с
Нижняя граница (Ууст.)	0.0108	0.0127
Верхняя граница (Ууст.)	0.0811	0.0954
Отклонение от нижней границы (Ууст.)	0.0000	0.0000
Максимальная амплитуда (Peak)	0.0811	0.0954
Время достижения максимума (Peak Time)	0.3871с	0.3871с

Поиск на тренажере других вариантов настройки штатной системы с регулятором Вудвард UG-40 показывает, что достигнутые качественные показатели практически не улучшаются, поскольку весь диапазон влияния настроечных органов на качество переходных процессов оказывается полностью исчерпанным. В статической системе существует установившаяся ошибка. Время переходного процесса, составляющее почти 2 с, может оказывать влияние на качество поддержания частоты вращения вала ГД и частоты переменного тока в электрической сети. Валогенератор жестко соединен с валом ГД. Поэтому при воздействии на систему возмущений могут существенно ухудшаться условия работы судовой электростанции, в частности при параллельной работе валогенератора с дизель-генераторными агрегатами, при ходе судна на волнении. На сильном волнении (более 5 баллов) воздействие изменяющегося во времени момента сопротивления винта сказывается на работе главного двигателя, вызывая значительные колебания параметров установки [1].

Совершенствование инструментального обеспечения тренажера машинного отделения с применением функций среды MATLAB позволяет использовать для отработки навыков управления судовыми автоматизированными системами и диагностики знаний в данной предметной области алгоритмы и программные компоненты, содержащиеся в среде MATLAB/Simulink. Специфика представления динамики системы в виде передаточных функций, уравнений в пространстве состояний, в виде модели, состоящей из нулей и полюсов, в форме частотных характеристик

и тому подобного определяет средства моделирования, методы синтеза и настройки регуляторов. Для настройки параметров инвариантных во времени систем в среде MATLAB принято использовать алгоритмы синтеза ПИД-регуляторов, LQR/LQG-регуляторов, частотные характеристики Боде, модальные методы синтеза и др. На практике наибольшее распространение получили ПИД-регуляторы. Причиной столь высокой их популярности является простота алгоритмов построения и промышленного использования, а также низкая стоимость. Модели ПИД-регуляторов отличаются ясностью функционирования в сложных структурах систем и пригодностью для параметрической настройки судовых систем.

Для улучшения динамических свойств системы регулирования частоты вращения вала ГД используем ПИД-регулятор.

Отметим, что в инструментарии Control Toolbox среды MATLAB для создания ПИД-регулятора с пропорциональным, интегральным и дифференциальным коэффициентами усиления K_p , K_i и K_d предусмотрена функция `pid`. Синтаксис функции:

$$C = \text{pid}(K_p, K_i, K_d, T_f).$$

где T_f — постоянная времени фильтра аperiodического звена. Передаточная функция модели ПИД-регулятора с параллельной структурой имеет вид

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d \cdot s}{T_f \cdot s + 1}. \quad (10)$$

При выборе параметров настройки следует помнить, что с увеличением K_p уменьшается ошибка в установившемся режиме, однако уменьшается и запас устойчивости по амплитуде и фазе, вследствие чего в системе могут возникнуть колебания. Введение интегрального коэффициента K_i способствует уменьшению до нуля статической ошибки в установившемся режиме за счет увеличения коэффициента передачи на низких частотах при снижении запасов устойчивости по фазе. С увеличением дифференциальной составляющей K_d возрастает коэффициент передачи на высоких частотах. В результате улучшается форма переходного процесса за счет снижения переуправления и уменьшения колебательности системы с ПИД-регулятором. Выбор T_f ограничивает влияние высокочастотных помех на систему управления.

В среде MATLAB также предусмотрена автоматическая настройка параметров ПИД-регулятора с помощью ПИД-тюнера и реализована процедура выбора коэффициентов по эталонной модели, что значительно упрощает решение задачи параметрической оптимизации систем.

Возвращаясь к структуре системы, представленной на рис. 1, и передаточным функциям (3)–(5), мы видим, что ПИД-регулятор введен в систему как блок $C(s)$. Чтобы исследовать регулировочные свойства существующей системы, были приняты значения коэффициентов $K_p = 1$, $K_i = 0$ и $K_d = 0$, что позволило исключить влияние регулятора на параметры настройки. Теперь исследуем возможности повышения качества настройки за счет выбора параметров ПИД-регулятора. Сначала на модели зададим значение коэффициента $K_p = 20$. В результате получим режим затухающих колебаний при существенном сокращении времени нахождения реакции $\omega(t)$ в активной области (RiseTime). Моделирование выполним, используя файл `sah794.m`. Далее выберем $K_i = 0.3$ и $K_d = 1.2$, при которых переходные процессы в системе значительно улучшены (рис. 3).

С помощью оператора `stepinfo(w,t)` для оценки показателей переходного процесса в модели, изображенного на верхнем графике (рис. 3), установлено:

Время нахождения реакции в активной области (RiseTime): 0.0297с.

Время переходного процесса (вхождения в 2%-ную область ошибки): 0.0456с.

Нижняя граница (Yуст.): 0.9073.

Верхняя граница (Yуст.): 1.0181.

Перерегулирование в %: 1.8773.

Отклонение от нижней границы (Yуст.): 0.

Максимальная амплитуда (Peak): 1.0181.

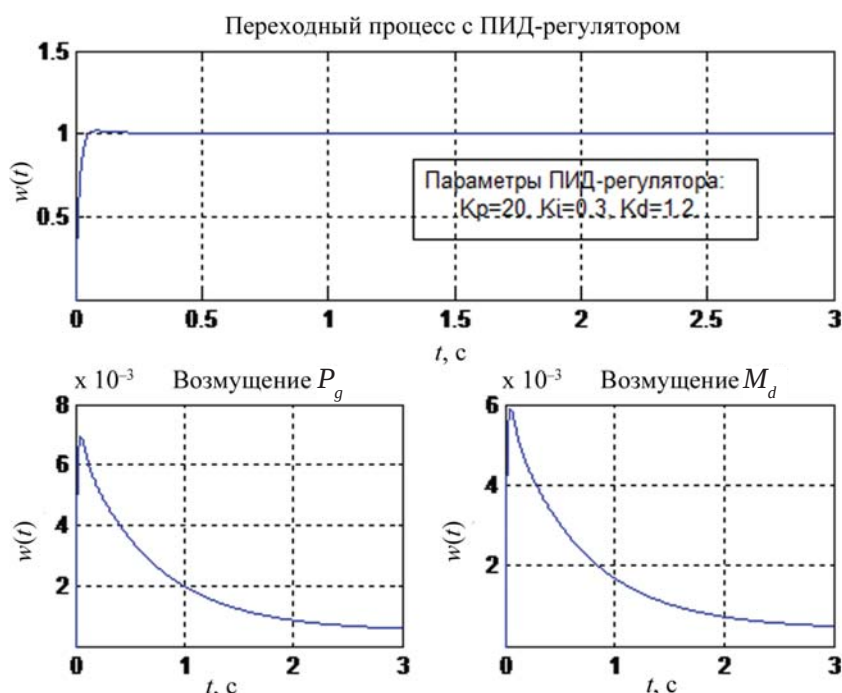


Рис. 3. Построение переходных процессов в системе с ПИД-регулятором

Получены передаточные функции замкнутой системы с ПИД-регулятором:

$$F1 = \frac{\omega(s)}{r(s)} = \frac{0,714s^3 + 12,92s^2 + 17,18s + 0,255}{0,01069s^4 + 0,8757s^3 + 13,06s^2 + 17,19s + 0,255}, \quad (11)$$

$$F22 = \frac{\omega(s)}{M_d(s)} = \frac{0,005628s^3 + 0,08064s^2 + 0,01s}{0,01069s^4 + 0,8757s^3 + 13,06s^2 + 17,19s + 0,255}, \quad (12)$$

$$F33 = \frac{\omega(s)}{P_g(s)} = \frac{0,004784s^3 + 0,06855s^2 + 0,0085s}{0,01069s^4 + 0,8757s^3 + 13,06s^2 + 17,19s + 0,255}. \quad (13)$$

Собственные значения приведенных зависимостей:

$$\lambda_1 = -62,8704; \quad \lambda_2 = -17,5651; \quad \lambda_3 = -1,4394; \quad \lambda_4 = -0,0150.$$

В окне ПИД-тюнера в интерактивном режиме был получен режим, близкий к приведенному выше при следующих значениях коэффициентов: $K_p = 16,4837$, $K_i = 12,2345$ и $K_d = 0,72045$. При этом перерегулирование составило 2,7 %, время переходного процесса (вхождения в 2 %-ную область ошибки) — 1,37 с, значение коэффициента робастности — 0,8. Для моделирования использовалась функция `pidtool`.

В заключение рассмотрим реакцию системы с ПИД-регулятором на одновременно действующие возмущения по моменту и мощности валогенератора. С этой целью сформируем сигнал прямоугольной формы, имитирующий изменение нагрузки валогенератора, и сигнал сложной формы, имитирующий изменение момента на валу. На рис. 4 приведена зависимость частоты вращения $\omega(t)$ вала дизеля (верхняя часть рисунка) от входных сигналов $r(t)$, $M_d(t)$ и $P_g(t)$, представленных в нижней его части.

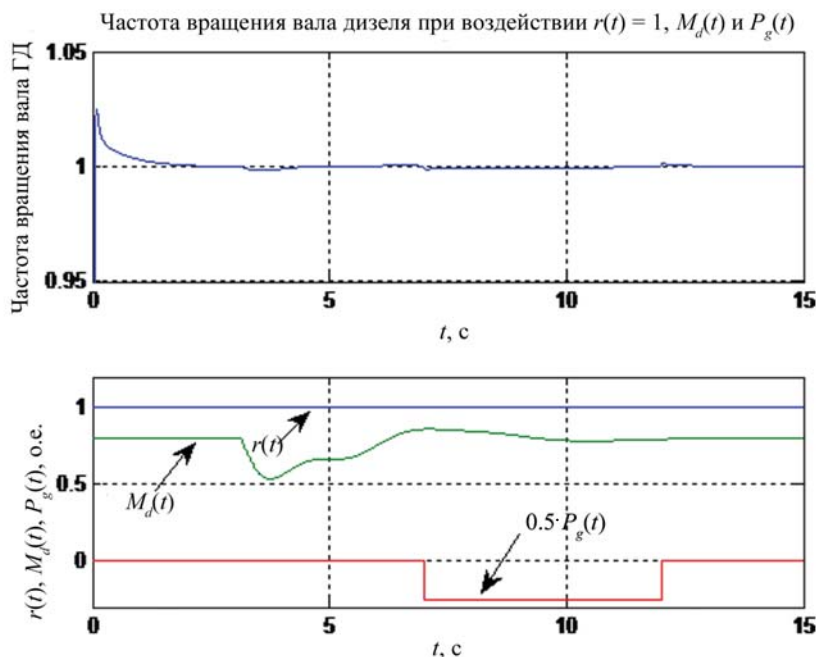


Рис. 4. Изменение частоты вращения вала ГД в рабочем режиме при воздействии входных сигналов $r(t)$, $M_d(t)$, $P_g(t)$

Из приведенных графиков следует, что система регулирования с ПИД-регулятором значительно превосходит по качественным показателям стационарную (штатную) систему. Видно, что она обладает свойствами робастности, что способствует стабилизации скорости вращения валогенератора и, следовательно, генерированию в судовую сеть электроэнергии высокого качества.

Моделирование с использованием средств MATLAB позволило значительно упростить получение конкретных решений, сократить время выполнения параметрической оптимизации и количественно оценить эффективность принимаемых решений. Результаты моделирования подтверждены на тренажере «Дизель–СИМ DPS 100 NORCONTROL AUTOMATION» путем введения расчетных параметров с пульта управления и вывода результатов на дисплей.

Развитие современной теории управления и средств автоматизации как сферы эффективного применения вычислительной техники для исследования и разработки сложных систем управления судовыми объектами, несомненно, должно способствовать созданию и разработке новых технологических решений, обеспечивающих конкурентоспособность отечественных судов, управляемых высококвалифицированными специалистами. Дальнейшее совершенствование теоретических знаний и повышение уровня квалификации обслуживающего персонала должно осуществляться на современных тренажерах, являющихся наиболее эффективным средством профессиональной подготовки судовых специалистов. Роль моделирования при изучении сложной судовой техники и повышении технического уровня ее эксплуатации является определяющей. На конкретном примере параметрической настройки в работе показано, что применение вычислительных средств с использованием технической базы тренажеров может значительно повысить качество принимаемых решений при их прозрачности и теоретической обоснованности.

Список литературы

1. Бусыгин В. П. Возможности улучшения САРЧ дизельными энергетическими установками с валогенераторами в предельных режимах / В. П. Бусыгин, И. П. Фиясь // Эксплуатация морского транспорта / под ред. П. С. Емельянова. — СПб.: Наука, 2003.

2. Королев В. И. Тренажерная подготовка судовых механиков. Тренажерная подготовка вахтенных механиков с использованием тренажера машинного отделения / В. И. Королев, А. Г. Таранин. — Новороссийск: МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2011. — Ч. 2. — 308 с.

УДК 621.436

А. В. Тузов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

DEFINITION OF PARAMETERS OF THE THERMAL EMISSION UNDER THE EXPERIMENTAL DISPLAY DIAGRAM OF THE DIESEL ENGINE

Основываясь на характере генерации активных центров в цепных реакциях, процесс сгорания описан с помощью кинетики цепных взаимодействий, предложенных академиком Н. Н. Семеновым. Используя этот механизм, в статье приводится методика определения основных характеристик сгорания: показателя сгорания m и условной продолжительности сгорания φ_z по индикаторной диаграмме дизельного двигателя.

Being based on character of generation of the active centers in chain reactions, combustion process is described with the help of kinetics of the chain interactions, offered by academician N. N. Semenov. Using this mechanism, article shows the technique of definition of the basic characteristics of combustion: an indicator of combustion and conditional duration of combustion by the display diagram of the diesel engine.

Ключевые слова: тепловыделение, индикаторная диаграмма, продолжительность сгорания.
Key words: thermal emission, the display diagram, duration of combustion.



ЗВЕСТНО, что сгорание определяется либо кинетическими процессами, либо диффузионными. Сгорание во всех его фазах является комплексом сложных взаимодействующих физико-химических процессов. В основе этого комплекса лежит химическая реакция топлива с кислородом воздуха.

Сгорание, как результат экзотермической химической реакции, определяется простыми термохимическими уравнениями, которые дают возможность определить теоретически необходимое количество воздуха для сгорания заданного количества топлива, а также состав и объем продуктов сгорания. Однако эти уравнения не дают представления о динамике процесса сгорания.

Процесс сгорания может быть описан, если в основу кинетики положить цепные взаимодействия, предложенные академиком Н. Н. Семеновым. В основе этого учения лежит представление о том, что превращение веществ (топливо и кислород воздуха) в процессе реакции проходит через ряд стадий, в которых образуются химически активные вещества, интенсивно взаимодействующие как с исходными веществами, так и друг с другом.

Промежуточные химически активные вещества называются активными центрами с одной или двумя свободными валентностями. Основываясь на характере генерации активных центров в цепных реакциях, очевидно, что количество активных центров dn за время dt связано с количеством сгоревшего за это время топлива dM , то есть $dM = Kdn$.