

УДК 621.438

А.И. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАЛОБОРОТНОМ ДИЗЕЛЕ С РЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЭВМ

Рассматривается малооборотный дизель с регулятором на основе управляющей ЭВМ. Рассмотрены алгоритмы для пропорционального регулирования и пропорционально-интегрального. Проанализировано влияние запаздывания на качество переходных процессов. Определены предельно допустимые времена запаздывания и интегрирования. Дано удобное для реализации на ЭВМ представление пропорционального и пропорционально-интегрального алгоритмов. Рассмотрено также влияние «дискретности» дизеля на качество переходных процессов. Сделан вывод о границах допустимости представления дизеля, как машины непрерывного действия.

Ключевые слова: дизель, регулятор, пропорционально-интегральный, пропорциональный алгоритм, управляющая ЭВМ.

Введение

Рассматривается малооборотный дизель, имеющий регулятор на базе управляющей ЭВМ. Минимальная комплектация регулятора: управляющая ЭВМ, исполнительный механизм и датчик скорости.

Исполнительный механизм, приводит в движение отсечной вал топливных насосов. Положение отсечного вала отождествляется с крутящим моментом на валу дизеля.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить дифференциальное уравнение движения дизеля с учетом применяемых алгоритмов регулирования.

Решая и анализируя полученные уравнения, необходимо сформулировать требования к системе управления.

1.1 Общие соображения

Уравнение движения дизеля может быть записано в следующем виде [1,2].

$$\dot{n}T_D = \mu_D - \mu_C, \quad (1)$$

где $n = \omega/\omega_n$ – нормированная скорость вращения;

$$T_D = J \frac{\omega_n}{M_{\text{мдм}}} - \text{постоянная времени дизеля;}$$

ω_n – номинальная угловая скорость вращения дизеля;

$$\mu_D = \frac{M_D}{M_{\text{мдм}}} - \text{нормированный момент дизеля;}$$

$$\mu_C = \frac{M_C}{M_{\text{мдм}}} - \text{нормированный момент сопротивления (нагрузка);}$$

$M_{\text{мдм}}$ – момент, соответствующий режиму

максимальной длительной мощности.

Рассмотрим пропорциональный алгоритм регулирования [1, 2]

$$\mu_D = \begin{cases} 1 & \text{при } n \leq n_z - \Delta; \\ \frac{n_z - n}{\Delta} & \text{при } n_z - \Delta > n > n_z; \\ 0 & \text{при } n > n_z, \end{cases}$$

где n_z – заданная нормированная скорость вращения.

Следует подчеркнуть, что в алгоритмах регулирования оперировать надлежит с крутящим моментом на валу дизеля. Именно крутящий момент подставляется в выражение (1). Другое дело, что часто крутящий момент отождествляют с топливоподачей. При применении управляющей ЭВМ необходимо выполнить расчеты и сформировать положение отсечного вала так, чтобы, момент на валу дизеля отвечал требованиям алгоритма.

Для дальнейшего анализа полагаем, что

$$\mu_D = h,$$

где h – нормированное положение отсечного вала.

Для пропорционального алгоритма уравнение (1) преобразуется к следующему виду

$$\dot{n}T_D + \frac{n}{\Delta} = \frac{n_z}{\Delta} - \mu_C.$$

Это уравнение можно привести к стандартному виду

$$\dot{n} + \frac{n}{\Delta T_D} = \frac{n_z}{\Delta T_D} - \frac{\mu_C}{T_D} \quad (2)$$

Решение этого уравнения известно [3] и имеет следующий вид

$$n = (n_z - \mu_C \Delta) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\Delta T_D}}\right),$$

где τ – текущее время.

Видно, что при идеальном пропорциональном регуляторе (рассмотренный регулятор идеален) переходный процесс – аperiodическая функция и такой регулятор не должен вызывать никаких проблем.

Для электронных регуляторов характерно наличие запаздывания, т.е. от момента начала замера скорости вращения и до отработки исполнительным механизмом сгенерированного регулятором задания проходит некоторое время. Тогда уравнение (2) можно представить в следующем виде

$$\dot{n} + \frac{n_p}{\Delta T_D} = \frac{n_z}{\Delta T_D} - \frac{\mu_C}{T_D} \quad (3)$$

В этом уравнении присутствуют две скорости вращения. Одна скорость вращения (точнее ускорение) – это скорость вращения вала дизеля. Другая скорость – n_p – это скорость, которую измерил регулятор. Для этой скорости можно записать

$$n_p = n - \dot{n} \tau_z, \quad (4)$$

где τ_z – время запаздывания.

Уравнение (4) получено путем разложения истинной скорости вращения в ряд Тейлора.

Скорость регулятора не та, что есть на самом деле, а та, которая была некоторое время назад (время запаздывания). Подставив выражение (4) в (3) получим

$$\dot{n} \left(1 - \frac{\tau_z}{\Delta T_D}\right) + \frac{n}{\Delta T_D} = \frac{n_z}{\Delta T_D} - \frac{\mu_C}{T_D} \quad (5)$$

Очевидно, что коэффициент при старшей производной в выражении (5) должен быть больше нуля. Тогда

$$\tau_z < \Delta \cdot T_D. \quad (6)$$

Для дизелей постоянная времени $T_D = 4$ с. Если наклон внешней характеристики дизеля с регулятором 5 %, т.е. $\Delta = 0,05$, то из (6) следует, что

$$\tau_z < 0,2 \text{ с.}$$

Для работы регулятора требуется запас параметров, поэтому время запаздывания желательно выбрать

$$\tau_z = 0,1 \text{ с.}$$

Это вполне достижимая величина при использовании современных средств.

Уравнение (3) легко решить на ЭВМ численным методом, например Рунге-Кутта или Хемминга. Автор отдал предпочтение методу Хемминга.

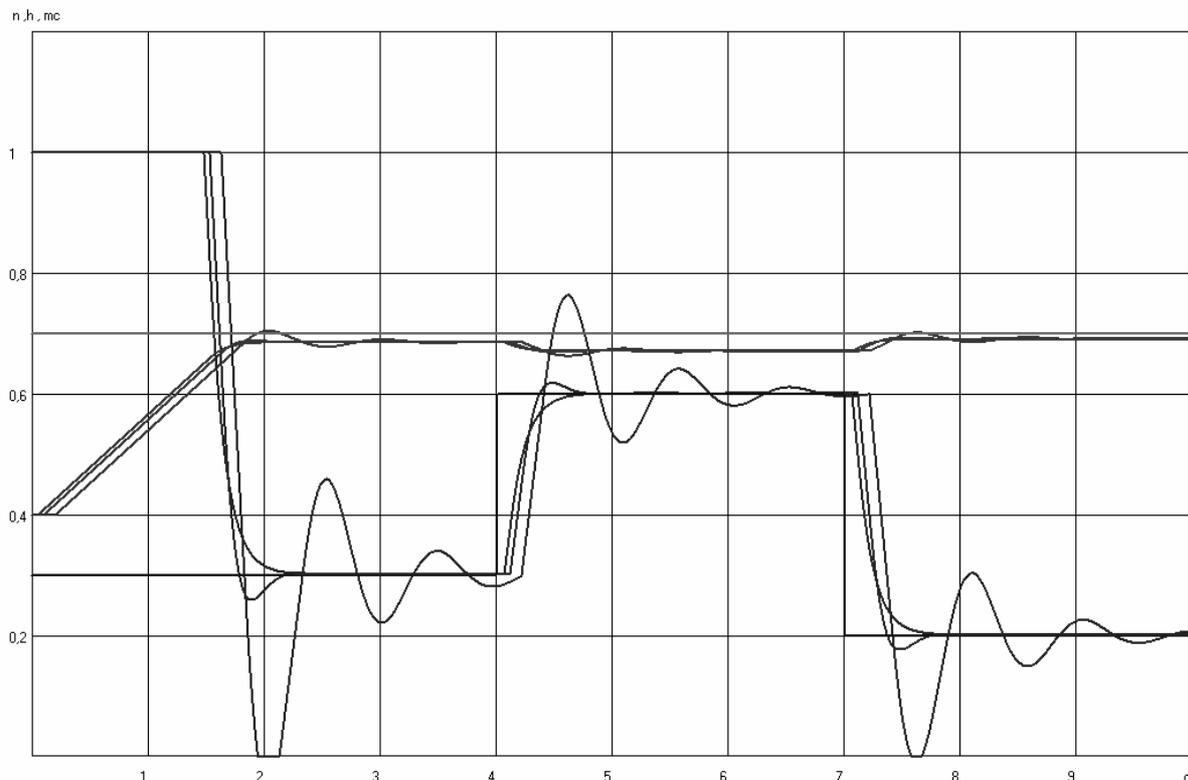


Рис. 1. Переходные процессы при пропорциональном регулировании с запаздыванием 50, 100 и 200 мс

На рис. 1 показаны переходные процессы при пропорциональном регулировании с запаздыванием 50, 100 и 200 мс. Видно, что при запаздывании 200 мс (0,2 с), переходный процесс неудовлетворительный. Следует учитывать, что в реальном регуляторе и дизеле переходный процесс будет хуже.

Пропорциональные регуляторы не всегда устраивают эксплуатационников, которые часто требуют астатических пропорционально-интегральных регуляторов.

При пропорционально-интегральном регулировании заданную для регулятора скорость определяют с помощью следующего выражения

$$n_{zI} = n_z + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} (n_z - n) dt,$$

где T_I – постоянная интегрирования.

Найденная n_{zI} используется в качестве заданной скорости в описанном выше пропорциональном алгоритме регулирования вместо n_z .

Если интеграл обозначить через I_{nt} , то

$$n_{zI} = n_z + I_{nt},$$

при этом должны выполняться соотношения

$$I_{nt} \leq \Delta \quad \text{и} \quad I_{nt} \geq 0.$$

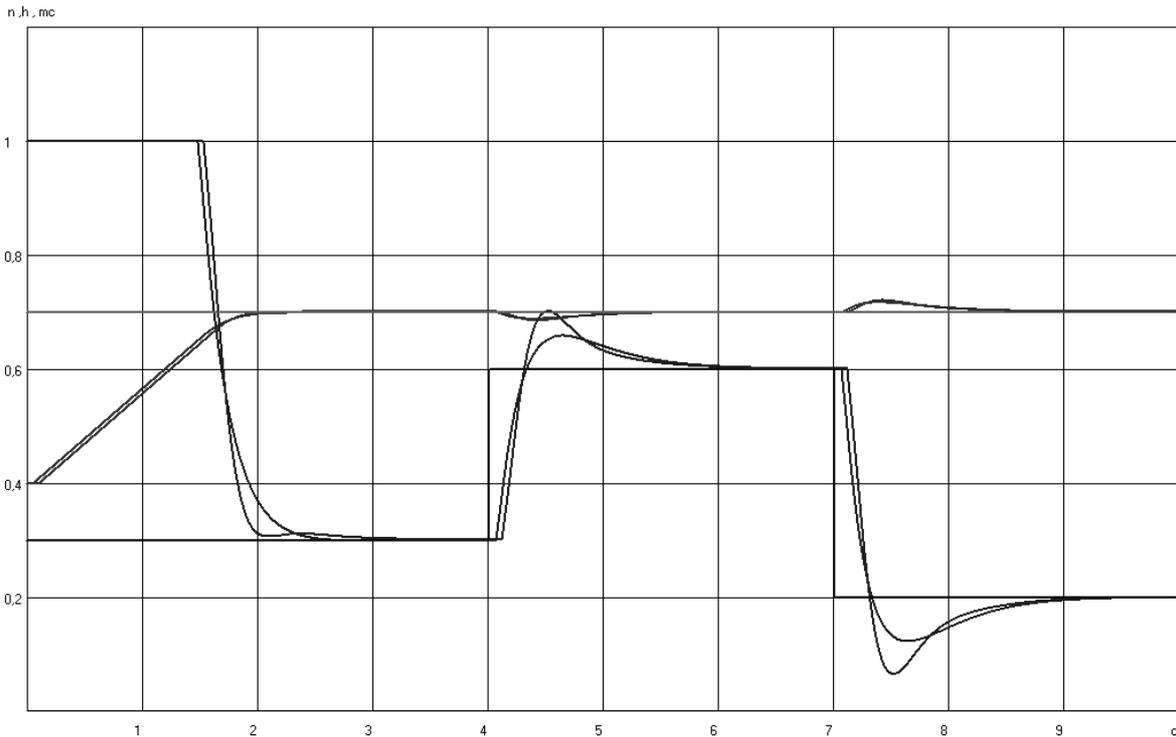


Рис. 2. Переходные процессы при пропорционально-интегральном регулировании с запаздыванием 50, 100 мс

На рис. 2 представлены переходные процессы при запаздывании 0,05 и 0,1 с. Переходный процесс при запаздывании 0,2 с неудовлетворительный и не представлен, чтобы не затемнять рисунок.

Используя пропорционально-интегральный алгоритм с помощью выражения (1) получим

$$\ddot{n} + \frac{\dot{n}_p}{\Delta T_D} + \frac{n_p}{\Delta T_D T_I} = \frac{n_z}{\Delta T_D T_I} - \frac{\dot{\mu}_C}{T_D}$$

или

$$\ddot{n} + 2\beta_0 \dot{n} + p_0^2 n = p_0^2 n_z - \frac{\dot{\mu}_C}{T_D}. \quad (7)$$

Индексы ноль означают, что запаздывание не учтено.

Уравнение движения с запаздыванием имеет

вид

$$\begin{aligned} \ddot{n} \left(1 - \frac{\tau_z}{\Delta T_D} \right) + \dot{n} \left(\frac{1}{\Delta T_D} - \frac{\tau_z}{\Delta T_D T_I} \right) + \frac{n}{\Delta T_D T_I} = \\ = \frac{n_z}{\Delta T_D T_I} - \frac{\dot{\mu}_C}{T_D}. \end{aligned}$$

Коэффициенты при производных должны быть больше нуля, тогда кроме выражения (6) можно записать

$$T_I > \tau_z. \quad (8)$$

Если уравнение движения рассмотреть в виде аналогичном (7), то справедливы следующие выражения:

$$p^2 = \frac{1}{T_I} \frac{1}{\Delta T_D - \tau_z} - \text{собственная частота,}$$

$$2\beta = \frac{1}{T_I} \frac{T_I - \tau_z}{\Delta T_D - \tau_z} - \text{коэффициент демпфирования.}$$

Проанализировать влияние запаздывания на эти величины удобно с помощью выражений:

$$\frac{\beta}{\beta_0} = \frac{1 - \frac{\tau_z}{T_I}}{1 - \frac{\tau_z}{\Delta T_D}}; \quad \frac{p^2}{p_0^2} = \frac{1}{1 - \frac{\tau_z}{\Delta T_D}}.$$

Заключение

Первое, что бросается в глаза при просмотре графиков рис. 1 и 2. – это очень хорошее качество переходных процессов. Таких хороших переходных процессов не бывает.

Если регулятор с запаздыванием 0,1 с получить можно, то качественный и быстрый замер скорости вращения вряд ли возможен. Дело в том, что скорость вращения колеблется между вспышками. Поэтому для получения качественного замера нужно время большее или равное времени вспышки, т.е. для малооборотного дизеля это время больше 0,07 с на номинальном режиме.

Если учитывать дискретную природу дизеля, то необходимо рассмотреть его собственное запаздывание. Действительно изменение подачи топлива в конкретный цилиндр не повлияет на рабочие процессы в остальных цилиндрах. Чтобы малооборотный дизель перешел на новый режим, нужен полный оборот, а это половина секунды. Все это делает некорректным представление дизеля, как непрерывного устройства на скоростях вращения ниже трехсот оборотов в минуту

Литература

1. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1968. – 535 с.
2. Тарасенко А.И. Алгоритм для стандартного электронного регулятора теплового двигателя / А.И. Тарасенко // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1999. – № 5 (365). – С. 12-18.
3. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на Фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

Поступила в редакцию 27.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В МАЛООБЕРТОВОМУ ДИЗЕЛІ З РЕГУЛЯТОРОМ НА БАЗІ КЕРУЮЧОЇ ЕОМ

О.І. Тарасенко

Розглядається малооборотний дизель з регулятором на базі керуючої ЕОМ. Розглянуто алгоритми для пропорційного та пропорційно-інтегрального регулювання. Проаналізовано вплив запізнювання на якість перехідних процесів. Визначено максимально допустимий час запізнювання та мінімальна стала часу інтегрування. Наведено зручну для реалізації на ЕОМ форму пропорційного та пропорційно-інтегрального алгоритмів регулювання. Розглянуто також вплив «дискретності» дизеля на якість перехідних процесів. Зроблено висновок про допустимі межі використання безперервної моделі дизеля для аналізу перехідних процесів.

Ключові слова: дизель, регулятор, пропорційно-інтегральний, пропорційний алгоритм, керуюча ЕОМ.

TRANSFORMER PROCESS IN LITTLE REVERSED DIESEL ENGINE WITH THE REGULATOR BASED ON CONTROLLING COMPUTER

A.I. Tarasenko

We view a little reversed diesel engine with the regulator based on controlling computer. Algorithm for proportional regulation and proportionally-integral one are rate. Influence of lag on quality transitional process are analyzed. Maximum possible time of lag and integration are determined. Comfortable for realization on computer presentation of proportional and proportionally-integral algorithms is given.

Key words: diesel engine, governor, proportionally-integral, algorithm for proportional, controlling computer.

Тарасенко Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования машин Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.