

УДК 621.436.036-523.8

ДИСКРЕТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.А. Епанешников¹, Ю.Е. Хрящев²

¹ОАО “Автодизель”, г. Ярославль, Российская Федерация
e-mail: d.a.epaneshnikov@gmail.com

²ЯГТУ, г. Ярославль, Российская Федерация
e-mail: khr.u.e@mail.ru

Приведен один из вариантов дискретной реализации ПИД-регулятора частоты вращения холостого хода дизельного двигателя. Исследование проведено на математической модели дизельного двигателя, при этом для определения значений коэффициентов регулятора использован аналитический метод.

Ключевые слова: управление, система, дизельный двигатель, частота вращения, ПИД-регулятор.

DISCRETE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR PID-REGULATOR OF DIESEL ENGINE SPEED

D.A. Epaneshnikov¹, Yu.E. Khryashev²

¹JSC “Avtodizel”, Yaroslavl, Russian Federation
e-mail: d.a.epaneshnikov@gmail.com

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
e-mail: khr.u.e@mail.ru

The article describes one of the possible discrete realizations of the idle speed PID governor for diesel engines. The research was carried out using both the mathematical model of a diesel engine and the analytical method for determining values of the governor factors.

Keywords: control, system, diesel engine, speed, PID-governor.

Управление частотой вращения современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) осуществляется с помощью электронных систем управления (ЭСУ). В основе большинства алгоритмов управления частотой вращения двигателей используются различные реализации пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов. В конструкциях аналоговых ЭСУ регулятор может функционировать по следующему закону [1]:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

где $u(t)$ — управляющее воздействие;

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

— рассогласование; $r(t)$ — заданное значение управляемого параметра; $y(t)$ — измеренное значение управляемого параметра; K — пропорциональный коэффициент; T_I — постоянная времени интегрирования; T_D — постоянная времени дифференцирования.

На практике из-за удобства реализации и настройки [2] часто применяется следующее выражение для вычисления управляющего воздействия ПИД-регулятора:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (3)$$

Коэффициенты в (3) вычисляются согласно следующим выражениям:

$$K_P = K, \quad K_I = \frac{K}{T_i}, \quad K_D = K T_i. \quad (4)$$

В современных микропроцессорных системах управления применяются дискретные алгоритмы вычисления управляющего воздействия. Реализуя закон управления как программный код микроконтроллера, обычно учитывают, что обработка сигналов и вычисление управляющего воздействия проводятся в дискретные моменты времени. Как правило, измерение сигнала и его квантование аналого-цифровым преобразователем (АЦП) выполняется через равные периоды времени h . Дискретная работа алгоритма приводит к появлению задержки в вычислении управляющего воздействия, а это, в свою очередь, — к существенным отличиям в работе аналоговых и цифровых реализаций ПИД-регуляторов.

Переходя к дискретному представлению выражения (3), используя z -преобразование, получаем следующее выражение [1]:

$$U(z) = K_P E(z) + \frac{K_I}{(1 - z^{-1})} E(z) + K_D (1 - z^{-1}) E(z). \quad (5)$$

Наиболее удобным является представление данного закона управления разностями параметров рассогласования в дискретные моменты времени [2]. Вычисление рассогласования для пропорционального и дифференциального компонентов регулятора заменяется разностью согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} e'_P &= br(k) - y(k); \\ e'_D &= cr(k) - y(k), \end{aligned} \quad (6)$$

где b, c — весовые коэффициенты (на практике коэффициент $c = 0$ [4]); k — дискретный момент времени, для которого вычисляется управляющее воздействие. Выражение для вычисления управляющего воздействия может быть записано в виде

$$u(k) = P(k) + I(k) + D(k), \quad (7)$$

где k — номер дискретного значения; P — пропорциональная составляющая; I — интегральная составляющая; D — дифференциальная составляющая.

Пропорциональная составляющая P может быть вычислена как [3]

$$P(k) = K (br(k) - y(k)), \tag{8}$$

где b — весовой фактор для учета влияния заданного значения на пропорциональную составляющую.

Интегральная составляющая вычисляется по выражению [3]

$$I(k + 1) = I(k) + b_{i1}e(k + 1) + b_{i2}e(k). \tag{9}$$

Значения коэффициентов b_{i1} и b_{i2} зависят от способа интегрирования и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для вычисления интегральной составляющей

Способ интегрирования	Коэффициент b_{i1}	Коэффициент b_{i2}
Метод левых прямоугольников	0	$\frac{Kh}{T_I}$
Метод правых прямоугольников	$\frac{Kh}{T_I}$	0
Метод средних прямоугольников / Метод трапеций	$\frac{Kh}{T_I \cdot 2}$	$\frac{Kh}{T_I \cdot 2}$

Когда ДВС работает на различных нагрузочно-скоростных режимах, существует вероятность того, что управляющее воздействие ЭСУ достигнет пределов рабочего диапазона исполнительного механизма. В этом случае исполнительный механизм остается в неизменном положении, несмотря на изменение управляющего воздействия. Обратная связь на данном режиме работы автоматически разрывается. Ошибка регулирования при этом продолжает накапливаться и интегральная составляющая существенно возрастает, что негативно сказывается на работе системы управления после вывода исполнительного механизма из “ограничения”. В целях предотвращения подобного явления алгоритмом управления должно предусматриваться ограничение максимального и минимального значений интегральной составляющей, а также сброс интегральной суммы в зависимости от условий работы.

Дифференциальная составляющая используется совместно с фильтром низких частот согласно следующему выражению в изображениях по Лапласу:

$$D = -\frac{sKT_D}{1 + sT_F} Y, \tag{10}$$

где D — изображение по Лапласу для дифференциальной составляющей; Y — изображение по Лапласу для управляемого параметра;

$$T_F = \frac{T_D}{N} \quad (11)$$

— постоянная времени фильтра, параметр фильтра $N = 8 \dots 10$.

Данные модификации позволяют обеспечить низкую восприимчивость дифференциальной составляющей к высокочастотным измерительным шумам.

Для вычисления дифференциальной составляющей используется следующее выражение [3]:

$$D(k) = \alpha D(k-1) - b_d (y(k) - y(k-1)). \quad (12)$$

Значения коэффициентов α и b_d зависят от способа дифференцирования и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов для вычисления дифференциальной составляющей

Способ дифференцирования	Коэффициент α	Коэффициент b_d
Метод левых прямоугольников	$1 - \frac{Nh}{T_d}$	KN
Метод правых прямоугольников	$\frac{T_D}{T_D + Nh}$	$\frac{KT_D N}{T_D + Nh}$
Метод средних прямоугольников	$\frac{2T_D - Nh}{2T_D + Nh}$	$\frac{2KT_D N}{2T_D + Nh}$
Метод трапеций	$e\left(\frac{-Nh}{T_D}\right)$	$\frac{KT_D \left(1 - e\left(\frac{-Nh}{T_D}\right)\right)}{h}$

При малых значениях постоянной времени дифференцирования лучшую производительность показывает метод левых прямоугольников [3]. На рис. 1 приведена структурная схема вычисления управляющего воздействия с использованием данного метода.

При выполнении синтеза алгоритма регулирования на базе ПИД-регулятора требуется определить коэффициенты, что можно выполнить либо на основе опыта эксперта, либо применяя различные расчетные методики.

Для применения расчетных методик требуется информация о математической модели объекта. Для примера в качестве модели объекта управления рассматривается модель дизельного двигателя ЯМЗ-238 применительно к режимам холостого хода. Параметры модели были определены и использованы в работах [5, 6], структурная схема модели приведена на рис. 1.

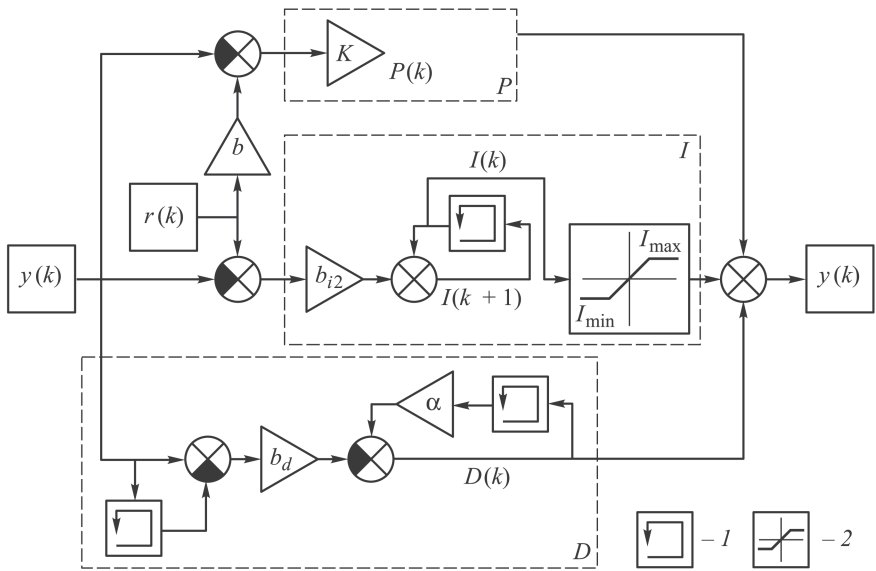


Рис. 1. Структурная схема алгоритма вычисления управляющего воздействия: *I* – функция, возвращающая результат предыдущей итерации; *2* – функция, ограничивающая минимальное и максимальные значения

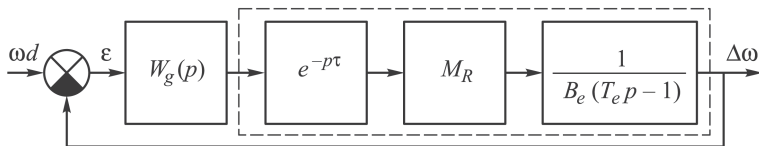


Рис. 2. Структурная схема системы управления для расчета параметров регулятора

Передаточная функция объекта управления системы, представленной на рис. 2, имеет следующий вид:

$$H(s) = \frac{M_R}{B_e (T_e s - 1)} e^{-s\tau};$$

$$H(s) = K \frac{1}{(T_e s - 1)} e^{-s\tau}; \quad (13)$$

$$K = \frac{M_R}{B_e},$$

где s – комплексная частота; M_R – крутящий момент двигателя, при полной подаче и угловой скорости коленчатого вала, равной ω_0 ; B_e – фактор устойчивости двигателя; T_e – постоянная времени двигателя; $e^{-s\tau}$ – время транспортной задержки,

$$M_R = 800 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad B_e = 3,4 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; \quad T_e = 1,25 \text{ с}; \quad \tau = 0,05 \text{ с}; \quad \omega_0 = 62,8 \text{ с}^{-1}. \quad (14)$$

Далее расчет коэффициентов выполняется по методу амплитудного оптимума [7], который может быть применен для настройки ПИД-

регулятора с передаточной функцией

$$H_g(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D s \right); \quad (15)$$

где K_P — коэффициент усиления регулятора; T_I — постоянная времени интегрирования; T_D — постоянная времени дифференцирования.

Коэффициенты регулятора вычисляются для объектов, описываемых передаточной функцией вида

$$H(s) = K \frac{b_0 \cdot 1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{a_0 \cdot 1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n} \cdot e^{-s\tau}, \quad (16)$$

где K — коэффициент усиления объекта; b_i — коэффициенты полинома числителя; a_i — коэффициенты полинома знаменателя; $e^{-s\tau}$ — значение транспортной задержки.

Метод позволяет получить в первом приближении значения коэффициентов ПИД-регулятора (параметры K_P , T_I , T_D). Точность вычисления зависит от точности математической модели.

Переходя к форме записи выражения для вычисления управляющего воздействия ПИД-регулятора представленной формулой (3), получаем следующие значения коэффициентов (см. табл. 3):

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{K_P}{2T_I}, \\ K_D &= K_P T_D. \end{aligned} \quad (17)$$

В результате расчета ПИД-регулятора по методу амплитудного оптимума получены следующие значения коэффициентов: $K_P = 0,069$; $T_I = 1,26$; $T_D = 0,011$; $K_I = 0,0014$; $K_D = 1,047$.

При переходе к простейшей дискретной реализации данного закона управления для интегрирования может быть использован метод левых прямоугольников:

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &\approx I_{\Sigma(n)} = \sum_{i=0}^n f(x_i) h; \\ I_{\Sigma(i)} &= I_{\Sigma(i-1)} + f(x_i) h. \end{aligned} \quad (18)$$

Аналогично для дифференцирования можно воспользоваться формулой Эйлера

$$\frac{df(x)}{dt} \approx \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{h}. \quad (19)$$

В итоге закон вычисления управляющего воздействия будет иметь вид

$$u(i) = K_P e(i) + K_I \sum_{i=0}^n e(i) h + K_D \frac{e(i) - e(i-1)}{h}. \quad (20)$$

Если вычислить значения коэффициентов как

$$K'_I = K_I h; \quad K'_D = \frac{K_D}{h}, \quad (21)$$

то формулу для вычисления управляющего воздействия можно упростить:

$$u(i) = K_P e(i) + K'_I \sum_{i=0}^n e(i) + K'_D (e(i) - e(i-1)). \quad (22)$$

Пример дискретной реализации алгоритма регулирования для вычислений с плавающей точкой приведен в листинге 1 на языке “С” (рис. 3).

```
typedef struct {
    double dState;
    double iState;
    double prePos;
    double pGain;
    double iGain;
    double iPos;
    double iNeg;
    double pWeight;
    double bDiff;
    double aDiff;
} PID;

double update_controller_output_astrom (PID *ctrl, double setpoint, double position) {

    double pTerm = 0;
    double dTerm = 0;
    double iTerm = 0;
    double error = setpoint - position;

    pTerm = ctrl->pGain * (ctrl->pWeight * setpoint - position);
    ctrl->iState += error;
    if (ctrl->iState > ctrl->iPos) ctrl->iState = ctrl->iPos;
    if (ctrl->iState < ctrl->iNeg) ctrl->iState = ctrl->iNeg;
    iTerm = ctrl->iGain * ctrl->iState;
    ctrl->dState = ctrl->aDiff * ctrl->dState - ctrl->bDiff * (position - ctrl->prePos);
    dTerm = ctrl->dState;
    ctrl->prePos = position;

    return (pTerm + iTerm + dTerm);
}
```

Рис. 3. Листинг 1. Структура данных и функция для вычисления управляющего воздействия

Формула для вычисления управляющего воздействия имеет вид

$$u(i) = K_P e(i) + K_I' \sum_{i=0}^n e(i) + (\alpha D(k-1) - b_d(y(i) - y(i-1))). \quad (23)$$

В структуре изменился алгоритм расчета дифференциальной составляющей и появилась возможность ограничения интегральной суммы. Дифференциальная составляющая вычисляется по значению управляемого параметра, что позволяет улучшить стабильность поддержания заданного значения при наличии случайных возмущений. На начальном этапе уместно использовать полученные ранее коэффициенты для пропорциональной и интегральной составляющих.

Результаты моделирования работы регулятора приведены на рис. 4.

Таким образом, был выполнен переход от аналоговой реализации закона управления к дискретному алгоритму, при этом для определения значений коэффициентов регулятора применен аналитический метод вычисления коэффициентов. Данный подход дает приемлемые результаты и для дискретной реализации алгоритма управления.

Применение весового фактора при вычислении пропорциональной составляющей и фильтра при вычислении дифференциальной составляющей регулятора дает возможность более гибкой настройки.

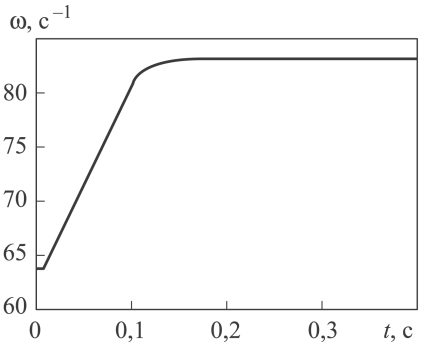


Рис. 4. График переходного процесса

ЛИТЕРАТУРА

1. Dorf P., Bishop P. Современные системы управления / пер. с англ. под ред. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
2. Yun Li, Ang Kiam Heong, Chong Gregory. PID Control System Analysis and Design // IEE Control Systems Magazine. 2006. No. 2. P. 32–41.
3. Astrom K.J., Hagglund T. PID Controllers. Theory. Design and Tuning // Secaucus NJ USA: Instrument Society of America. 1994. 200 p.
4. Wescott Tim. PID without Ph.D. // EE Times-India. 2000. No. 10. P. 10–20.
5. Субботина С.И., Скобелкин С.З., Хрящев Ю.Е. Определение параметров системы автоматического регулирования скорости дизеля // Деп. НИИНАвтопром, 1979. № 9/95–Д393.
6. Барков Ю.А. Синтез регулятора частоты вращения для дизель-генераторной установки / Деп. ВИНТИ, 24.04.05. № 603–В2005.
7. Vrancic D. Design of Anti-Windup and Bumpless Transfer Protection: Ph.D. Thesis, Ljubljana, 1997. 170 p.

REFERENCES

- [1] Dorf R.C, Bishop R.H. Modern Control Systems (Russ. ed.: Sovremennyye sistemy upravleniya. Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy Publ., 2002. 832 p.).

- [2] Yun Li, Ang Kiam Heong, Chong Gregory. PID Control System Analysis and Design. *IEE Control Systems Magazine*, 2006, no. 2, pp. 32–41.
- [3] Astrom K.J., Hagglund T. PID Controllers. Theory. Design and Tuning. Secaucus NJ USA: Instrument Society of America, 1994. 200 p.
- [4] Wescott Tim. PID without Ph.D. *EE Times-India*, 2000, no. 10, pp. 10–20.
- [5] Subbotina S.I., Skobelkin S.Z., Khryashchev Yu.E. Determining the Parameters of Automatic Diesel Engine Speed Control System. *Dep. NIINAvtoprom*, 1979, no. 9/95–D393 (in Russ.).
- [6] Barkov Yu.A. Synthesis of the Speed Controller for a Diesel Generator Set. *Dep. VINITI*, 24.04.05, no. 603–V2005 (in Russ.).
- [7] Vrancic D. Design of Anti-Windup and Bumpless Transfer Protection: Ph.D. Thesis, Ljubljana, 1997. 170 p.

Статья поступила в редакцию 21.05.2014

Епанешников Дмитрий Андреевич — инженер-исследователь ОАО “Автодизель”. Автор 10 научных работ в области тепловых двигателей, математического моделирования, автоматического управления и регулирования.

ОАО “Автодизель”, Российская Федерация, 150040, г. Ярославль, пр-т Октября, д. 75.

Epaneshnikov D.A. — research engineer of JSC “Avtodisel”. Author of 10 publications in the fields of heat engines, mathematical modelling, automatic control and automatic regulation.

JSC “Avtodisel”, pr-t Oktyabrya 75, Yaroslavl, 150040 Russian Federation.

Хрящев Юрий Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Двигатели внутреннего сгорания” Ярославского государственного технического университета (ЯГТУ). Автор 154 научных работ в области тепловых двигателей, математического моделирования, автоматического управления и регулирования, мехатроники, технологии машиностроения.

ЯГТУ, Российская Федерация, 150023, г. Ярославль, Московский пр-т, д. 88.

Khryashev Yu.E. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the “Internal Combustion Engine” Department of Yaroslavl State Technical University. Author of 154 publications in the fields of heat engines, mathematical modelling, automatic control and regulation, mechatronics, mechanical engineering.

Yaroslavl State Technical University, Moscovskiy pr-t 88, Yaroslavl, 150023 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Епанешников Д.А., Хрящев Ю.Е. Дискретная реализация алгоритма ПИД-регулятора частоты вращения дизельного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 134–142.

Please cite this article in English as:

Epaneshnikov D.A., Khryashev Yu.E. Discrete Implementation of the Algorithm for PID-Regulator of Diesel Engine Speed. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 134–142.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сдано в набор 15.04.2015

Подписано в печать 25.05.2015

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 12,42

Уч.-изд. л. 13,28

Заказ

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана