

УПРАВЛЕНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Манойло В. М.¹

¹Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Аннотация. Получены соотношения и рассмотрены ограничения, позволяющие оценить значения основных параметров цифрового регулятора, обеспечивающего стабилизацию заданной частоты вращения коленчатого вала газового ДВС.

Ключевые слова: дроссельная заслонка, система управления, структурная схема, передаточная функция, разностные уравнения.

Введение

Управление изменением частоты вращения коленчатого вала ДВС с микропроцессорной подачей газа осуществляется с помощью электроуправляемой поворотной заслонки. С изменением положения (поворотом) относительно корпуса, в котором находится заслонка, изменяется проходное сечение, а соответственно изменяется и секундный расход воздуха, поступающий в цилиндры ДВС. От согласованной работы системы питания и поворотной заслонки узла системы воздухообеспечения зависят стабильно высокие технико-экономические и экологические показатели рабочего процесса газового ДВС. Поэтому в данной работе основное внимание будет уделено модели упрощенной структурной схемы системы управления частотой вращения вала газового ДВС.

Анализ последних исследований и публикаций

Системы управления динамическими объектами с цифровыми регуляторами представляют собой достаточно сложный для описания класс систем [1, 2]. Непрерывная часть системы (объект управления) описывается дифференциальными уравнениями, тогда как микропроцессоры, реализующие алгоритмы управления, представлены разностными уравнениями.

На практике получили распространение модели, которые описывают поведение системы лишь в дискретные моменты времени. В этом случае удается ограничиться лишь разностными уравнениями, что радикально упрощает описание рассматриваемых систем и решение задачи синтеза регуляторов.

Цель расчетно-экспериментального исследования

Определение коэффициентов цифрового регулятора системы управления дроссельной заслонкой газового ДВС.

Описание модели управления дроссельной заслонкой

Альтернативный подход предполагает использование исходного описания системы в виде дифференциальных уравнений и синтез непрерывных регуляторов. Уже после синтеза непрерывных регуляторов преобразуются к дискретному виду для реализации в виде микропроцессорных программ.

Структура регулятора

Упрощенная структурная схема системы управления (СУ) частотой вращения коленчатого вала представлена на рис. 1.

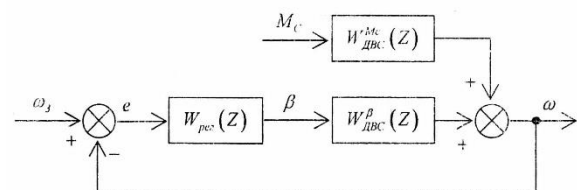


Рис. 1. Упрощенная структурная схема СУ газового ДВС

Дискретная передаточная функция объекта управления относительно задающего воздействия при наличии постоянного запаздывания d с экстраполятором нулевого порядка на входе представлена соотношением

$$W_{ДВС}^{\beta} = \frac{\omega(Z)}{\beta(Z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_n \cdot z^{-m}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_m \cdot z^{-m}} \cdot z^{-d}.$$

Дискретная передаточная функция объекта управления относительно задающего воздействия имеет следующий вид

$$W_{ДВС}^{M_c} = \frac{\omega(Z)}{M_c(Z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_n \cdot z^{-m}}{a_{01} + a_{11} \cdot z^{-1} + \dots + a_{m1} \cdot z^{-m}}.$$

В качестве параметрически – оптимизируемого регулятора будем использовать линейный регулятор второго порядка

$$W_{рег}(Z) = \frac{\beta(Z)}{e(Z)} = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + \dots + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}}.$$

Разностное уравнение, описывающее данный регулятор, имеет вид:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2).$$

Для получения хорошего качества процессов управления параметры q_0, q_1, q_2 должны выбираться с учетом характеристик объекта управления. Однако на данном этапе разработки газового ДВС идентификация его математической модели представляется нецелесообразной в силу неопределенности многих конструктивных решений.

Будем считать, что проектируемая система управления характеризуется относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. В таких условиях рекомендуется использование ПИД-регуляторов.

Возникает необходимость определения допустимых значений коэффициентов регулятора, величина которых в дальнейшем будет уточняться в процессе испытаний газового ДВС.

Ограничения на величины параметров регулятора

Рассмотрим единичное ступенчатое изменение сигнала ошибки

$$e(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases}.$$

В этом случае, согласно разностному уравнению регулятора, его выходной сигнал

$$\begin{aligned} \beta(0) &= q_0; \\ \beta(1) &= \beta(0) + q_0 + q_1 = 2 \cdot q_0 + q_1; \\ \beta(2) &= \beta(1) + q_0 + q_1 + q_2 = 3 \cdot q_0 + 2 \cdot q_1 + q_2; \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta(k) &= \beta(k-1) + q_0 + q_1 + q_2 = (k=1) \cdot q_0 + \\ &+ k \cdot q_1 + (k-1)q_2. \end{aligned}$$

Для того, чтобы рассматриваемый регулятор обладал свойствами непрерывного ПИД-регулятора наложим ограничения на его коэффициенты:

$$\begin{aligned} q_0 &> 0; \\ q_1 &< -q_0; \\ q_2 &> -(q_0 + q_1); \\ q_2 &< q_0. \end{aligned}$$

Первые три ограничения обеспечивают выполнение условий $\beta(0) > \beta(1)$ и $\beta(k) > \beta(k-1)$, $k \geq 2$. Последнее ограничение обеспечивает положительный коэффициент передачи регулятора. Допустимые области расположения коэффициентов на числовой оси иллюстрирует рис.2.

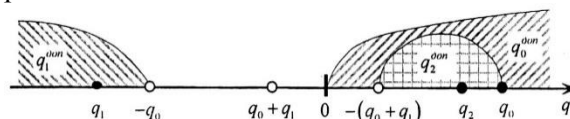


Рис. 2. Допустимые области расположения коэффициентов на числовой оси

Введем следующие коэффициенты, характеризующие свойства регулятора:

$$K = q_0 - q_1 \text{ – коэффициент передачи;}$$

$$C_D = \frac{q_1}{K} \text{ – коэффициент опережения;}$$

$$C_1 = \frac{q_0 + q_1 + q_2}{K} \text{ – коэффициент инте-}$$

грирования.

При малых значениях период дискретизации T_D данные коэффициенты связаны с соответствующими коэффициентами непрерывных ПИД-алгоритмов управления:

$$K = K^H; \quad C_D \approx \frac{T_D^H}{T_D}; \quad C_1 \approx \frac{T_D}{T_1^H}.$$

Реакция регулятора на единичное входное воздействие приведена на рис.3.

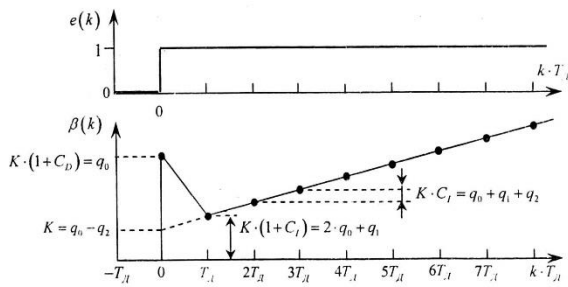


Рис. 3. Реакция регулятора на единичное входное воздействие

На рис 4 приведено приращение $\Delta\beta(k) = \beta(k) - \beta(k-1)$ реакций ПИД-регулятора, П-регулятора ($K \neq 0, C_D = C_1 = 0; q_0 = -q_1 \neq 0, q_2 = 0$), Д-регулятора ($C_D \neq 0, K = C_1 = 0; q_0 = -q_2 \neq 0, q_1 = -2 \cdot q_2$), а также И-регулятора ($C_1 \neq 0, K = C_D = 0; q_0 = q_2 = 0, q_1 \neq 0$), на воздействие в виде единичного импульса ограниченной длительности.

Коэффициенты регулятора

Используя передаточные функции объекта в составе замкнутой системы управления связь между задающей и управляющей переменными можно представить следующим образом:

$$\frac{\beta(Z)}{\omega_1(Z)_1} = \frac{W_{pez}(Z)}{1 + W_{pez}(Z) \cdot W_{ДВС}^\beta(Z)}$$

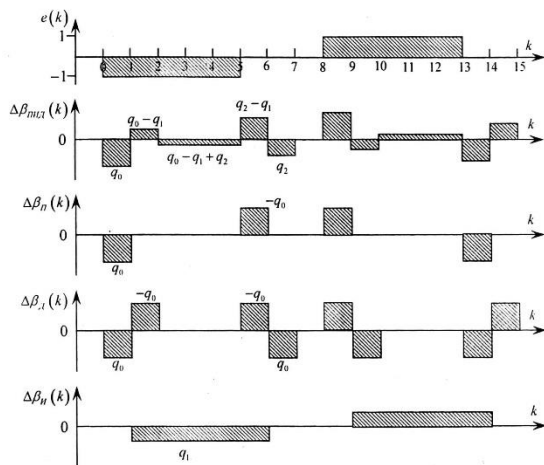


Рис. 4. Приращения реакций регуляторов

Используя передаточные функции объекта управления и регулятора можно записать разностное уравнение, разрешенное относительно управляющей переменной:

$$\begin{aligned} \beta(k) &= (1 - a_1) \cdot \beta(k-1) + a_1 \cdot \beta(k-2) - \dots \\ &\dots - a_m \cdot \beta(k-m-1) - q_0 \cdot b_0 \cdot \beta(k-d) - \dots \\ &\dots - q_0 \cdot b_1 \cdot \beta(k-d-1) - q_0 \cdot b_m \cdot \beta(k-d-m) - \dots \\ &\dots - q_1 \cdot b_0 \cdot \beta(k-d-1) - q_1 \cdot b_1 \cdot \beta(k-d-2) - \dots \\ &\dots - q_1 \cdot b_m \cdot \beta(k-d-m-1) - q_2 \cdot b_0 \cdot \beta(k-d-2) - \dots \\ &\dots - q_2 \cdot b_1 \cdot \beta(k-d-3) - q_2 \cdot b_m \cdot \beta(k-d-m-2) + \dots \\ &\dots + q_0 \cdot \omega(k) + q_0 \cdot a_1 \cdot \omega(k-1) + q_0 \cdot a_m \cdot \omega(k-m) + \dots \\ &\dots + q_1 \cdot \omega(k-1) + q_1 a_1 \omega(k-2) + q_1 \cdot a_m \cdot \omega(k-m-1) + \dots \\ &\dots + q_2 \cdot \omega(k-2) + q_2 \cdot a_1 \cdot \omega(k-3) + q_2 \cdot a_m \cdot \omega(k-n-2). \end{aligned}$$

Из последнего уравнения следует, что при подаче на вход системы ступенчатого задающего воздействия $\omega_3(k) = w \cdot 1(k)$ при нулевых начальных условиях первые значения управляющей переменной определяются следующими выражениями:

– при отсутствии запаздывания ($d = 0$)

$$\beta(0) = \frac{q_0}{1 + q_0 \cdot b_0} \cdot w;$$

$$\beta(1) = \left[\frac{q_0 \cdot (1 - a_1 - q_0 \cdot b_1 - q_1 \cdot b_2)}{(1 + q_0 \cdot b_0)^2} + \dots \right] \cdot w;$$

– при наличии запаздывания $d = 1$

$$\beta(0) = q_0 \cdot w;$$

$$\beta(1) = \left[2 - q_0 \cdot b_0 + \frac{q_1}{q_0} \right] \cdot q_0 \cdot w;$$

– при наличии запаздывания $d > 1$

$$\beta(1) = [2 \cdot q_0 + q_1] \cdot w.$$

$$\Delta\beta(k) = \beta(k) - \beta(k-1).$$

Как видно из данных выражений, при ступенчатом изменении входного сигнала величина управляющего воздействия в начальный момент времени $\beta(0)$ не зависит от параметров объекта управления при наличии задержки, превышающей период квантования, либо при $b_0 = 0$ и определяется только значением параметра регулятора.

В рассматриваемой системе для управления частотой вращения коленчатого вала предполагается использовать изменение углового положения дроссельной заслонки при помощи шаго-

вого двигателя. При этом приращение управляющего воздействия на каждом шаге дискретизации

$$\Delta\beta(k) = \beta(k) - \beta(k-1)$$

может задаваться в диапазоне $0 \div 255$ шагов, где каждый шаг соответствует изменению углового положения дроссельной заслонки на $0,225^\circ$.

Задавшись максимальным приращением задающего воздействия $\Delta\omega_3^{\max}$ которое должно вызывать максимально возможное перемещение дроссельной заслонки за один период дискретизации, учитывая, что $\beta(-1) = 0$, можно определить значение параметра регулятора q_0 :

$$q_0 = \frac{\Delta\beta^{\max}}{\Delta\omega_3^{\max}}.$$

Существуют рекомендации (Зиглера и Никольса), согласно которым для обеспечения удовлетворительного качества регулирования при выборе коэффициентов ПИД-регулятора следует придерживаться следующих соотношений:

$$C_D \approx \frac{T_D^H}{T_D} \approx 1,25; \quad C_1 \approx \frac{T_D}{T_1^H} \approx 0,2.$$

В этом случае можно записать:

$$q_2 = \frac{C_D}{C_D + 1} \cdot q_0;$$

$$q_1 = (C_1 - 1) \cdot q_0 - (C_1 + 1) \cdot q_2.$$

Приведенные соотношения позволяют выбрать начальные значения параметров регулятора q_0, q_1, q_2 , которые в дальнейшем могут быть уточнены экспериментально с учетом рассмотренных выше ограничений.

Представление коэффициентов

При программной реализации регулятора на базе микропроцессоров общего применения его коэффициенты удобно представлять в виде

$$q = \frac{A}{2^n},$$

где $A = m$ – разрядное целое без знаковое число, $A = 0 \dots (2^m - 1)$;

n – разрядное целое без знаковое двоичное число.

Знак каждого коэффициента хранится в отдельном флаге и учитывается при выполнении арифметических операций.

Такое представление коэффициентов при реализации алгоритма управления позволяет ограничиться выполнением только операций сложения, умножения целых чисел и сдвига.

При рассматриваемом способе представления коэффициентов величина шага их квантования зависит не только, от количества двоичных разрядов m , но и от величины соответствующего коэффициента.

В диапазоне $q = 0 \dots 1$ точность задания коэффициентов зависит от величины n и, как правило, избыточна. Шаг квантования при этом

$$\Delta q_0 = \frac{1}{2^n}.$$

При $q > 1$ можно выделить m поддиапазонов величин коэффициентов, имеющих различные значения шага квантования.

$$q_{\min.k} = \frac{2^m}{2^k}.$$

Конец k -го поддиапазона

$$q_{\max.k} = \frac{2^m - 1}{2^{(k-1)}}.$$

Шаг квантования для k -го поддиапазона

$$\Delta q_k = \frac{1}{2^{|k-1|}},$$

где $k = 1 \dots m$.

Рассмотренные соотношения позволяют обеспечить необходимую точность представления коэффициентов.

Период дискретизации

При выборе периода дискретизации T_D системы управления необходимо учитывать следующие факторы:

- требуемое качество управления;
- динамические свойства объекта управления;
- динамические свойства исполнительного устройства и его привода;
- динамические свойства датчиков;
- спектральный состав возмущающих воздействий;

– вычислительные затраты и стоимость контура управления;
– эргономические требования при наличии оператора.

Часть требований, которые необходимо учитывать при выборе периода дискретизации оказываются противоречивыми. В результате, в каждом конкретном случае, приходится принимать компромиссное решение.

Некоторые эмпирические правила для определения периода дискретизации систематизированы в [1].

В общем случае, чем меньше период дискретизации, тем лучшее качество управления можно обеспечить. Однако, при очень малых значениях периода дискретизации, дальнейшее улучшение качества достигается лишь при существенном возрастании затрат на управление.

Часто величина периода дискретизации, обеспечивающая заданное качество управления, оказывается больше той, которая обеспечивает близкую аппроксимацию непрерывного контура управления.

Для обеспечения хорошего качества управления низкочастотными объектами достаточно иметь 6÷15 выборок за период, определяемый временем T_{ω}^{95}

$$T_D = (0,067 + 0,167) \cdot T_{\omega}^{95},$$

где T_{ω}^{95} – время достижения регулируемой координатой величины, равной 95% ее установившегося значения при ступенчатом изменении задающего сигнала. Для объектов управления первого порядка $T^{95} = \tau + 3 \cdot T$, где τ – запаздывание в объекте; T – постоянная времени.

Выводы

Полученные соотношения позволяют осуществить предварительную оценку значений коэффициентов цифрового регулятора, необходимого количества двоичных разрядов для их представления, а также выбрать требуемый период дискретизации сигналов микропроцессорной системы управления газового ДВС. В дальнейшем значения этих параметров могут быть уточнены в процессе экспериментальных исследований с учетом рассмотренных ограничений.

Литература

1. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер.с англ / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.
3. Манойло В.М. Конструктивные особенности дроссельных узлов систем воздухообеспечения автотракторных ДВС /Манойло В.М., Липинский М.С., Дзюбенко А.А.// Электронный журнал «Автомобільна електроніка. Сучасні технології». – Х.: ХНАДУ.– 2017.– Вип. 11. – С. 38 - 45.
4. Пат. на кор. модель 110618 Україна, F01L/00, F02M23/00.00. Дросельний вузол системи повітропостачання ДВЗ /Ф.І. Абрамчук, В.М. Манойло, О.А. Дзюбенко, М.С. Липинський.- заявка № а2013 00833 від 24.01.2013; опубл. 25.10.2016. Бюл. № 20.

References

1. Izerman R. Digital control systems / R. Iserman. – Moscow: Mir, 1984. – 541 p.
2. Methods of classical and modern theory of automatic control: A textbook in 5 volumes; T.3: Synthesis of regulators of automatic control systems / Ed. K.A. Pupkov and N.D. Egupova. - Moscow: Izdatelstvo MGTU im. NE Bauman, 2004. – 616 p.
3. Manoylo V.M. Constructive features of throttle knots of air supply systems of autotractor internal combustion engines / Manoylo V.M, Lipinskii M.S, Dzyubenko A.A // Electronic Journal "Automotive Electronics. Modern technology". - Kh. KhNADU - 2017. – Ed. 11. – P. 38 - 45.
4. Patent for Utility Model 110618 Ukraine, F01L / 00, F02M23 / 00.00. Choke center of air supply system engine / F.I. Abramchuk, V.M. Manoylo, O.A. Dzyubenko, M.S. Lipinsky - application № a2013 00833 dated January 24, 2013; has published 25.10.2016. Bul. No. 20.

Поступила (received) 28.09.2018 р.

Манойло Владимир Максимович¹, доцент, к.т.н., vladimir.m.manoylo@gmail.com, +38 095-710-96-28,

¹Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Московский проспект, 45.

Throttle control of the system vehicle air supply

Abstract: A simplified structural diagram of the control system (CS) of the crankshaft rotation frequency is developed, which uses the discrete transfer function of the control object and the discrete transfer function of the control object with respect to the driving force. As a parametrically optimized regulator, a second-order linear regulator is used. The projected control system is characterized by a relatively low noise level and the amount of lag in the control object. In such conditions, the use of PID regulators is recommended. To

ensure that the regulator in question had the properties of a continuous PID controller, constraints on its coefficients were imposed. In the system under consideration, it is proposed to use the stepper motor to change the angular position of the throttle valve to control the speed of the crankshaft. The obtained ratios allow preliminary estimation of the values of the coefficients of the digital controller, and also select the required sampling period for the signals of the microprocessor control system of the gas internal combustion engine. In the future, the values of the selected parameters should be refined in the course of experimental studies taking into account the limitations considered.

Key words: throttle, control system, structural diagram, transfer function, difference equations.

Manoylo Vladimir¹, Associate Professor, Ph.D., +38095-710-96-28, vladimir.m.manoylo@gmail.com
¹Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko, Kharkov, Moskovsky prospect, 45.

Управління дросельною заслінкою системи повітропостачання автотранспортного двигуна

Анотація: Розроблена спрощена структурна схема системи управління (СУ) частотою обертання колінчастого вала, в якій використовується дискретна передавальна функція об'єкта управління і дискретна передавальна функція об'єкта управління відносно, який задає впливу. В яко-

сті параметрично-оптимізуючого регулятора застосовується лінійний регулятор другого порядку. Проектована система управління характеризується відносно малим рівнем шумів і величиною запізнювання в об'єкті управління. В таких умовах рекомендується використання ПІД-регуляторів. Для того, щоб розглянутий регулятор мав властивості безперервного ПІД-регулятора були накладені обмеження на його коефіцієнти. У даній системі для управління частотою обертання колінчастого вала передбачається використовувати зміну кутового положення дросельної заслінки за допомогою крокового двигуна. Отримані співвідношення дозволяють здійснити попередню оцінку значень коефіцієнтів цифрового регулятора, а також вибрати необхідний період дискретизації сигналів мікропроцесорної системи управління газового ДВЗ. Надалі значення обраних параметрів повинні бути уточнені в процесі експериментальних досліджень з урахуванням розглянутих обмежень.

Ключові слова: дросельна заслінка, система управління, структурна схема, передавальна функція, різнищеві рівняння.

Манойло Володимир Максимович¹, доцент, к.т.н., vladimir.m.manoylo @gmail.com, +38 095-710-96-28,

¹Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків, Московський проспект, 45.