

А.А. Лисовал, А.В. Вербовский, Ю.А. Свистун

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Описана структура и принцип работы модели электронного ПИД-регулятора скорости дизеля, совместно с топливным насосом высокого давления. Данная модель совместно с моделью дизеля и с учетом внешней нагрузки позволяет исследовать влияние ПИД-параметров регулятора скорости на переходные процессы и показатели работы двигателя. Описана работа электронного блока управления, задающей электронной педали управления, исполнительного механизма, который воздействует на орган дозирования топлива. Модель может учитывать вибрации различного уровня, которые передаются на орган дозирования топлива.

Введение

В дизелестроении находят широкое применение электронные системы управления двигателем и его системами. Стимулирует этот процесс, в первую очередь, внедрение быстродействующих систем топливоподачи с высокой энергией впрыска. Для современных аккумуляторных систем топливоподачи, типа Common Rail, в функциях остается обязательным автоматическое регулирование частоты вращения коленчатого вала дизеля [1, 2].

Отрабатывать архитектуру и наладку параметров для электронных систем автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) коленчатого вала дизеля возможно на традиционных системах топливоподачи с блочным насосом высокого давления (ТНВД), заменив механический регулятор на электронный. В этом направлении продолжает свои разработки и исследования кафедра двигателей и теплотехники Национального транспортного университета совместно с Институтом газа НАН Украины. В том числе, созданы двухрежимный и всережимный микропроцессорные регуляторы скорости к автотракторному дизелю 4ЧН 12/14 [3, 4].

В представленной статье описана структура и принцип работы математической модели всережимной электронной САРЧ дизеля с ПИД-законом управления.

Всережимный ПИД-регулятор скорости создан на базе стандартных узлов регулятора фирмы HEINZMANN [4]. Кроме дизеля 4ЧН 12/14, разработанный электронный регулятор скорости был успешно применен на газовом двигателе 8ГЧ10/8,8 для привода газовой заслонки дозатора газа. Особенности математической модели для электронного регулятора скорости газового двигателя в данной статье не приведены.

За основу математической модели электронного всережимного регулятора скорости взята разработка модели двухрежимного регулятора и полученные на ней результаты [3]. Математическая модель САРЧ дизеля прошла проверку на адекватность на установившихся и динамических режимах

работы. Были проведены расчетные исследования по влиянию внешних воздействий (вибраций) на электронную САРЧ в установившихся режимах работы дизеля 4ЧН 12/14 с электронным двухрежимным регулятором.

Цель статьи – оценка потенциала разработанной математической модели электронного всережимного регулятора скорости двигателя внутреннего сгорания в системе MATLAB/ Simulink.

На примере математической модели всережимной САРЧ дизеля описан процесс расчета цикловой подачи топлива, моделирование внешних вибраций на орган дозирования топлива. Процесс ввода внешних вибраций можно реализовывать и на установившихся на динамических режимах работы двигателя.

Структура модели

Разработанная математическая модель всережимного электронного регулятора скорости может работать автономно либо совместно с моделью дизеля или газового двигателя с искровым зажиганием.

Модель независимо от архитектуры подключения ПИД-параметров воспроизводит работу электронного блока управления, задающего органа – электронной педали управления, исполнительного механизма (ИМ), который воздействует на орган дозирования топлива. Модель также обеспечивает возможность проводить исследования влияния уровня вибраций двигателя или неравномерности цикловой подачи топлива по цилиндрам двигателя. На рис. 1 показана математическая модель электронной САРЧ дизеля с ТНВД. Математическая модель создана и работает в программной среде MATLAB / Simulink. Под каждым блоком на рис. 1 сохранено его название, соответствующее программной среде MATLAB.

Входными параметрами (сигналами) математической модели являются положение электронной педали (Fir1) и частота вращения коленчатого вала дизеля (NDv1). Выходным параметром является цикловая подача топлива дизеля (Gc).

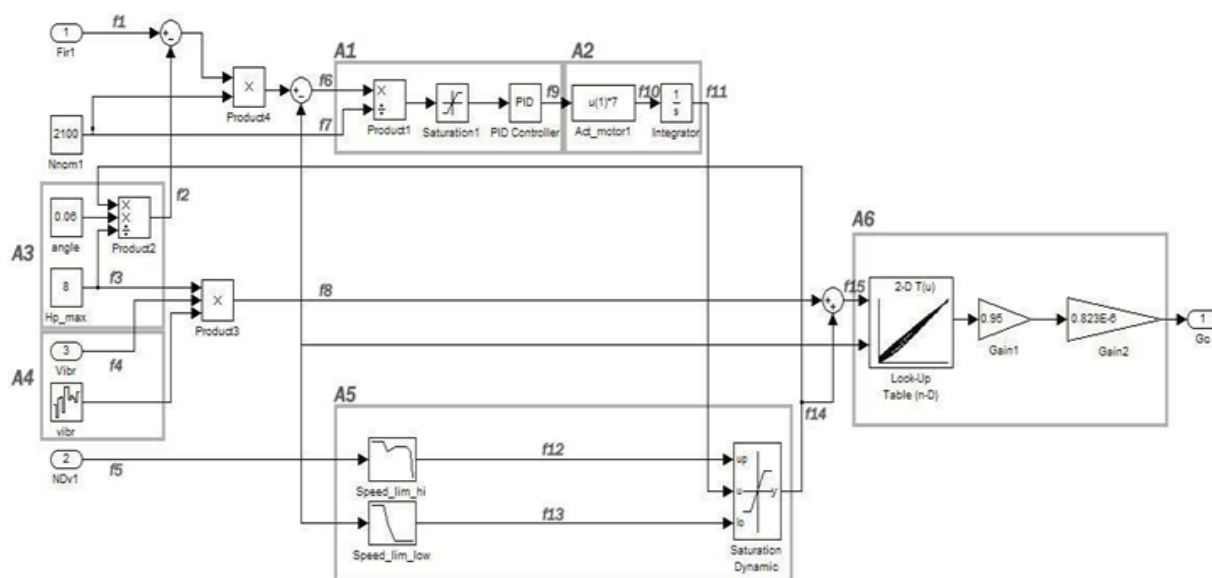


Рис. 1. Математическая модель электронной САРЧ дизеля с ТНВД

На рис. 1 обозначено: А1-А6 – функциональные блоки электронной САРЧ совместно с ТНВД; f1-f15 – связи между функциональными блоками модели.

В функциональном блоке А1 происходит моделирование работы электронного блока управления с ПИД-регулированием частоты вращения коленчатого вала дизеля. В основу блока заложено уравнение

$$e_{PID}(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $e_{PID}(t)$ – выходной сигнал блока управления; $e(t)$ – входной сигнал блока управления; K_p , K_I и K_D – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления соответствующих ПИД-параметров.

Блок А2 моделирует работу исполнительного механизма, который кинематически соединен с рейкой ТНВД. Блок А3 позволяет изменять угол наклона регуляторной ветви. Функциональный блок А4 введен для имитации воздействия внешних вибраций от дизеля к электронной САРЧ и наоборот – воздействия вибраций от САРЧ на дизель. Блок А5 ограничивает верхние и нижние предельные значения цикловых подач топлива. Верхнее ограничение формирует внешнюю скоростную характеристику дизеля, нижнее – характеристику холостого хода.

Блок А6 воспроизводит работу безынерционного звена «ТНВД», которое включает: непосредственно ТНВД, форсунки, трубопроводы высокого давления. Характеристики ТНВД задавались графически-матричным способом по результатам обработки характеристик с фиксированной рейкой.

Принцип работы модели

Частота вращения коленчатого вала дизеля измерялась при помощи датчика Холла, подключенного к электронному блоку управления А1. На рис. 1 ввод сигнала от датчика частоты обозначен «NDv1». Управление эксплуатационным режимом работы дизеля выполнялось задающим органом – электронной педалью управления «Fir1».

Электронный блок управления А1 обрабатывает сигналы электронной педали управления Fir1, датчика обратной связи f11 по положению вала исполнительного механизма и датчика частоты вращения NDv1 коленчатого вала двигателя. По заданной программе в блоках А1-А3, с учетом ограничений блока А5 рассчитывается положение исполнительного механизма, которое поступает в блок А6. Изменения положения исполнительного механизма приводят к перемещению рейки ТНВД, как следствие – к изменению величины цикловой подачи Gc топлива и изменению частоты вращения коленчатого вала двигателя. Изменённая цикловая подача может быть использована в программном модуле «дизель», описание этого модуля в статье не приводится. Двигатель реагирует на изменения цикловой подачи изменением частоты вращения, которая возвращается в модель электронной САРЧ как сигнал датчика NDv1.

Входные параметры положения педали Fir1, коэффициента вибраций Vitr являются безразмерными величинами, которые изменяются в диапазоне от 0 до 1. Частота вращения коленчатого вала NDv1 задается в мин^{-1} .

Выходной сигнал цикловой подачи Gc топлива дизеля рассчитывали в граммах за цикл.

Для настройки модели под различные типы двигателей и для учёта эксплуатационных особенностей введен ряд констант. Константа Nnom1 задает максимальное значение частоты вращения коленчатого вала двигателя. Константа Angle – угол наклона регуляторной ветви. Константа Нр_max ограничивает максимальное перемещение рейки ТНВД.

Блок Look-up table задает характеристику ТНВД в графически-матричной форме. Размер матрицы для дизелей был задан матрицей «цикловая подача - перемещение рейки» (размерность матрицы 8x8). Блоками Speed_limit_hi и Speed_limit_low задавались ограничения хода рейки ТНВД, которые формируют внешнюю скоростную характеристику и характеристику холостого хода соответственно.

К значению положения электронной педали управления f1 в сумматоре добавляется поправка f2 на угол наклона регуляторной ветви. Поправка f2 рассчитывается по текущему и максимальному значению положения рейки ТНВД, имеет безразмерное значение. Диапазон коррекции для f2 от 0 до 1.

Благодаря константе Nnom1 безразмерное значение Fir1 пересчитывается в мин⁻¹ и сравнивается с текущим значением частоты вращения. Разница частот f6 с учетом опорного значения f7 частоты вращения превращается в безразмерную величину, которые изменяются от -1 до 1. Этот сигнал поступает в блок А1 ПИД-регулятора. Выходной сигнал f9 было представлено в виде напряжения питания исполнительного механизма (от - 4,5 до + 4,5 В).

В функциональном блоке А6 исполнительного механизма Act_motor1 значение силы тока превращает в крутящий момент f10 на выходном валу ИМ. Этот блок базируется на уравнении исполнительного механизма

$$M_{ИМ}(i_{ИМ}) = a \cdot i_{ИМ}^2 + b \cdot i_{ИМ} + c, \quad (2)$$

где a , b , c – коэффициенты аппроксимации характеристики ИМ; $M_{ИМ}$ – нагрузка на валу ИМ; $i_{ИМ}$ – сила тока ИМ.

Значение крутящего момента f10 поступают в блок интегрирования уравнения

$$\frac{d\varphi}{d(i_{ИМ})} = \frac{M_{ИМ}(i_{ИМ}) - M_{ПП}}{m_E r_B^2}, \quad (3)$$

где φ – угол поворота вала ИМ; $M_{ПП}$ – сопротивление пружины ИМ; m_E – приведенная к оси ИМ масса подвижных частей ТНВД и ИМ; r_B – длина рычага на оси ИМ.

После интегрирования угол поворота вала ИМ пересчитывается в перемещение f11 рейки ТНВД.

Это значение определяется в миллиметрах хода рейки.

Далее положение рейки ТНВД ограничивается в зависимости от текущей частоты вращения коленчатого вала. В блоке А5 с помощью ограничительных кривых Speed_limit_hi и Speed_limit_low происходит коррекция значение f5 частоты вращения и превращение в предельные значения f12 и f13, соответственно. Рассчитанное в блоке А2 значение f11 положения рейки ТНВД корректируется с учетом предельных значений f12 и f13.

На рис. 2 изображена графическая интерпретация алгоритма выбора системой САРЧ дизеля положения рейки ТНВД, т.е. иллюстрация алгоритма расчета цикловой подачи топлива при все-режимном регулировании.

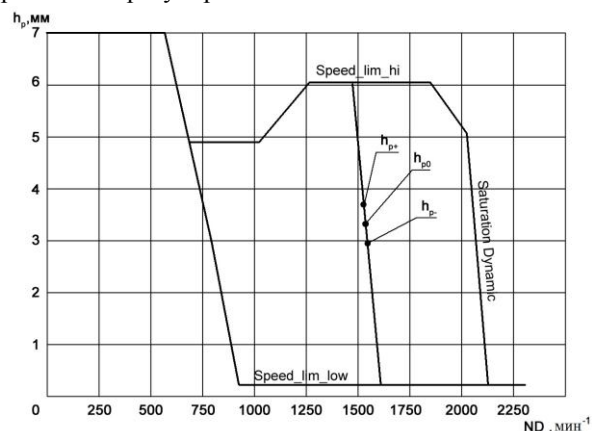


Рис. 2. Графическая интерпретация алгоритма выбора системой положения рейки ТНВД

Текущее положение рейки h_{p0} , рассчитывается в блоках А1 и А2 (рис. 1), корректируется в блоках Speed_limit_hi и Speed_limit_low (рис. 2) – ограничивающие кривые максимального и минимального рабочего положения рейки. Saturation Dynamic (рис. 2) – ограничение максимальной частотой вращения с учетом угла наклона регуляторной ветви.

Если на валу дизеля увеличивается нагрузка, значение h_{p0} растет по регуляторной ветке. С учетом коррекции угла наклона регуляторной ветви (блок А3 на рис. 1) рабочая точка системы переходит в положение h_{p+} . В случае уменьшения нагрузки на валу двигателя, значение положения рейки уменьшается, и система переходит в точку h_{p-} на регуляторной ветви. Изменения положения рейки ТНВД приводят к изменению цикловой подачи топлива в цилиндры дизеля, и как следствие – к изменению частоты вращения коленчатого вала.

Математическая модель при помощи А4 предполагает имитацию вибраций, которая осуществляется генератором случайных колебаний и коэффициентом вибраций Vibr. Генератор Vibr

задает период колебаний, а коэффициентом можно изменять амплитуду. Безразмерное значение f_4 коэффициента V_{ibr} благодаря константе Np_{max} через связь f_3 превращается в колебания рейки ТНВД. Заданные внешние возмущения из-за связи f_8 добавляются к определенному положению f_{14} рейки ТНВД. Далее в блоке А6 с помощью графически-матричной программы Look-up table рассчитывается цикловая подача G_c топлива дизеля, с учетом вибраций.

Заключение

Введение в модель внешних вибраций приближает результаты расчета к действительным условиям работы САРЧ двигателя, что повышает вероятность правильного выбора рациональных параметров ПИД-регулятора, оценки устойчивости системы. В первую очередь влияние внешних вибраций необходимо учитывать для автотракторных двигателей с электронной САРЧ, которые эксплуатируются в широком скоростном и нагрузочном диапазонах. Вибрации могут восприниматься электронным блоком управления как ложный сигнал на изменение положения органа дозирования топлива.

Список литературы:

1. Прохоренко А.А. Математическое моделирование и расчетно-экспериментальное исследование механизма регулирования подачи ТНВД аккумуляторной топливной системы дизеля [Текст] / А.А. Прохоренко, И.Г. Пожидаяев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – №2. –

С. 3–8. 2. Прохоренко А.А. Математическая модель САРЧ дизеля с аккумуляторной ТС в пространстве состояний [Текст] / А.А. Прохоренко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – №1. – С. 14–19. 3. Лисовал А.А. Микропроцессорный регулятор дизеля и расчёт цикловой подачи топлива [Текст] / А.А. Лисовал, С.В. Кострица, А.В. Вербовский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 58–61. 4. Лисовал А.А. Всережимный электронный регулятор дизеля колесного транспортного средства [Текст] / А.А. Лисовал, А.В. Вербовский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – №1. – С. 49–52.

Bibliography (transliterated):

1. Prohorenko A.A., Pozhidaev I.G. (2014), "Mathematical modeling and computational and experimental investigation of the mechanism of regulation of the fuel supply pump of the storage system of a diesel engine", *Internal combustion engines*, [Matematicheskoe modelirovanie i raschetno-eksperimentalnoe issledovanie mehanizma regulirovaniya podachi TNVD akkumulyatornoy toplivnoy sistemy dizelya, Dvigateli vnutrennego sgoraniya], № 2, pp. 3-8. 2. Prohorenko A.A. (2015), "Mathematical model ATS diesel engine with common rail system in the state space", *Internal combustion engines*, [Matematicheskaya model SAR dizelya s akkumulyatornoy TS v prostranstve sostoyaniy, Dvigateli vnutrennego sgoraniya], № 1, pp. 14-19. 3. Lisoval A.A., Kostriytsya S.V., Verbovskiy A.V. (2010), "The microprocessor control of diesel and calculation of the cycle fuel supply", *Internal combustion engines*, [Mikroprotsessornyiy regulyator dizelya i raschet tsiklovy podachi topliva, Dvigateli vnutrennego sgoraniya], № 2, pp. 58-61. 4. Lisoval A.A., Verbovskiy A.V. (2012), "All-speed electronic control diesel wheeled vehicle", *Internal combustion engines*, [Vserezhimnyiy elektronnyiy regulyator dizelya kolesnogo transportnogo sredstva, Dvigateli vnutrennego sgoraniya], № 1, pp. 49-52.

Поступила в редакцию 12.07.2016

Лисовал Анатолий Анатольевич – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры двигателей и теплотехники Национального транспортного университета, Киев, Украина, e-mail: li-dvz@bigmir.net.

Вербовский Алексей Валериевич – аспирант Национального транспортного университета, младший научный сотрудник Института газа НАНУ, Киев, Украина, e-mail: verbov@bigmir.net.

Свистун Юрий Анатольевич – аспирант Национального транспортного университета, Киев, Украина, e-mail: svystun_yurec@ukr.net.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

А.А. Лисовал, О.В. Вербовський, Ю.А. Свистун

Описано структуру та принцип роботи моделі електронного ПІД-регулятора швидкості дизеля, спільно з паливним насосом високого тиску. Дана модель разом з моделлю дизеля і при врахуванні зовнішнього навантаження дозволяє досліджувати вплив ПІД-параметрів регулятора швидкості на перехідні процеси і показники роботи двигуна. Незалежно від архітектури включення ПІД-параметрів відтворюється робота електронного блоку управління, яка задається електронною педаллю управління та виконавчим механізмом, який впливає на орган дозування палива. Модель може враховувати вібрації різного рівня, які передаються на орган дозування палива.

MODELING OF ELECTRONIC SPEED PID-CONTROLLER OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

A.A. Lisoval, A.V. Verbovskiy, Yu.A. Svistun

Describes the structure and working principle of electronic model PID speed controller, in conjunction with diesel fuel pump of high pressure. This model, together with a model of a diesel engine and given external load allows you to explore the influence of PID speed controller parameters for transients and the performance of the engine. Describes the electronic control unit that defines electronic pedal control, actuator, which affects the body dispensing fuel. Model may take into account the different levels of vibration, which are transmitted to the body dispensing fuel.