

## НАСТРОЙКА ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ДИЗЕЛЯ

На стационарных и судовых дизелях получают широкое распространение электронные системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) коленчатого вала, в которых используются ПИД-законы регулирования. На дизелях наземного транспорта ПИД-регуляторы стали применяться сравнительно недавно при переходе от механических и гидромеханических САРЧ к микропроцессорным. При эксплуатации этих САРЧ перед обслуживающим персоналом возникает задача выбора параметров настройки ПИД-регуляторов с учетом динамических свойств силовых установок. Однако в настоящее время отсутствуют научно-обоснованные методики выбора коэффициентов усиления П-, И- и Д-каналов. По этой причине силовые установки эксплуатируются не на оптимальных динамических режимах.

В связи с изложенным представляется актуальным проанализировать метод настройки ПИД-регулятора дизеля наземного транспортного средства.

В работах [1, 2] приведена методика и этапы создания двухрежимной электронной САРЧ для автомобильного дизеля 4СН12/14 с полугими частичными характеристиками. Эти работы выполнены в Национальном транспортном университете (НТУ) совместно с Институтом газа НАН Украины. В экспериментальном двухрежимном регуляторе, созданном на основе микроконтроллера серии PIC 16 фирмы Microchip, был реализован ПИ-закон регулирования [3].

Дальнейшие работы по созданию электронного регулятора были сосредоточены на всережимном регулировании частоты вращения с реализацией ПИД-закона регулирования. В отличие от двухрежимного электронного регулятора всережимная версия была собрана на основе узлов фирмы Heinzmann. Для реализации ПИД-закона регулирования частоты вращения выбран электронный блок управления Pandaros и применена более совершенная конструкция исполнительного механизма [3]. В зависимости от количества секций ТНВД (6 или 8) исполнительные механизмы регуляторов создавали максимальные усилия 1,4 Н и 3,6 Н при угле поворота выходного вала 36 °.

Последовательность настройки всережимного регулятора фирмы Heinzmann разработана применительно к дизелям 8С13/14 и 6С13/14 (ЯМЗ-238 и ЯМЗ-236).

Особенность электронного блока Pandaros – последовательное соединение П-регулятора и ПИД-регулятора [4]. П-регулятор обеспечивает формирование главной регуляторной ветви и всережимных частотных характеристик. Наклон всех регуляторных ветвей одинаков и может задаваться при настройке. Последующий ПИД-регулятор по существу является регулятором исполнительного механизма и влияет на качество переходных процессов. В исполнительном механизме введена обратная связь по положению выходного вала и ограничивается максимальная сила тока.

Настройка ПИД-регулятора выполнялась на дизель-электрическом агрегате АГД-100С-Т400, в котором приводом был дизель 6Ч13/14. Дизель при  $1500 \text{ мин}^{-1}$  развивал мощность 100 кВт. Внешняя нагрузка создавалась реостатами. П-регулятор был настроен на степень неравномерности 0,2 %.

Настройка ПИД-параметров была начата с режима холостого хода и далее проверена в динамике при сбросе-набросе 100 % нагрузки. Все операции по сбросу-набросу нагрузки фиксировались при помощи цифровой записи.

Правильность настройки и выбора коэффициентов усиления П-, И- и Д-каналов оценивалась по показателям качества переходного процесса САРЧ дизеля согласно ГОСТ 10511-83: длительность переходного процесса, заброс частоты вращения, нестабильность частоты. Были определены рациональные значения ПИД-параметров по соответствующим каналам: П – 15 %; И – 23 %; Д – 3 %. Возможная максимальная степень усиления по каждому каналу составляла 100 %.

В результате было установлено, что при изменении выбранного рационального значения коэффициента усиления по П-каналу прямо пропорционально изменялись и значения коэффициентов усиления двух других (И и Д) каналов, и наоборот. Это позволило выбранные ПИД-параметры для номинального режима изменять пропорционально с помощью введенного суммарного корректирующего коэффициента

$$K_{\Sigma} = K_N \cdot K_V, \quad (1)$$

где  $K_N$ ,  $K_V$  – корректирующие коэффициенты по нагрузке и частоте вращения коленчатого вала.

Коэффициент  $K_{\Sigma}$  оказывал мультипликативное влияние на выбранные экспериментально значения ПИД-параметров. Значения корректирующих коэффициентов  $K_N$  и  $K_V$  на номинальном режиме дизель-электрического агрегата принимались за единицу.

Для определения значений корректирующих коэффициентов  $K_N$  и  $K_V$  во всём поле нагрузок и частот вращения были проведены исследования:

определение  $K_N$  на дизеле 6Ч13/14 при частоте вращения привода генератора 1500 мин<sup>-1</sup> с пошаговым изменением нагрузки;

определение  $K_V$  на дизеле 8Ч13/14 в режиме холостого хода.

Значения корректирующего коэффициента  $K_V$  в режиме холостого хода определялись на дизеле 8Ч13/14, который был установлен на колёсный трактор Т150К.

Результаты двух этапов исследования приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1  
Значения корректирующего коэффициента  $K_N$

Нагрузка на дизель, кВт	Коэффициент $K_N$
0 ... 40	0,45
60	0,70
80	0,90
100	1,00

Таблица 2  
Значения корректирующего коэффициента  $K_V$

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Коэффициент $K_V$
900 ... 1200	0,9
1500	1,0
1800	1,1
2100	1,2

Установлено, что с уменьшением мощности дизеля значения корректирующего коэффициента  $K_N$  необходимо уменьшать. При значениях внешней нагрузки на дизель менее 50 % выбранные значения ПИД-параметров изменяются незначительно.

Из полученных значений корректирующих коэффициентов  $K_N$  и  $K_V$  по формуле (1) был рассчитан суммарный корректирующий коэффициент  $K_\Sigma$ , общий для всего рабочего диапазона дизеля 8Ч13/14. В табл. 3 приведен массив опорных точек, состоящий из значений суммарного поправочного коэффициента  $K_\Sigma$ .

Опорные точки, которые приведены в табл. 3, были внесены в энергонезависимую память микроконтроллера.

Для подтверждения правильности настроек ПИД-регулятора были проведены испытания дизеля 8Ч13/14 на тракторе Т150К при разгонах с переключением передач. При таких разгонах переходные процессы в САРЧ дизеля возбуждаются не набросом нагрузки как в дизель-

электрическом агрегате, а смешанным внешним воздействием – нажатием на электронную педаль и одновременно набросом нагрузки, которая передается через сцепление от трансмиссии.

Таблица 3

Значения суммарного корректирующего коэффициента  $K_{\Sigma}$

Мощность, %	Коэффициент $K_{\Sigma}$ при частоте вращения, $\text{мин}^{-1}$				
	900	1200	1500	1800	2100
0	0,40	0,40	0,45	0,50	0,55
20	0,40	0,40	0,45	0,50	0,55
40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,55
60	0,65	0,65	0,70	0,80	0,85
80	0,80	0,80	0,90	1,00	1,10
100	0,90	0,90	1,00	1,10	1,20

Мощность дизеля 8Ч13/14 по паспорту составляла 128,7 кВт при 2100  $\text{мин}^{-1}$  (на дизеле был установлен ТНВД типа 80.05-30 с всережимным электронным регулятором частоты). Степень неравномерности регуляторных ветвей была установлена 6 %.

Испытания проводились на горизонтальном участке асфальтной дороги длиной 50 м. Дизель разгонялся на первой передаче (на второй транспортной скорости) с последующим переключением передач до четвертой и достижением скорости 12 км/ч.

Было выполнено 11 заездов в одном направлении с цифровой записью параметров САРЧ дизеля и трактора, из которых были отобраны 5 результатов, для которых разгон трактора до 12 км/час занял в среднем 30 м. На рис. показан фрагмент цифровой записи переходных процессов в электронной САРЧ дизеля при включении и разгоне трактора на первой передаче.

Показанные на рис. переходные процессы САРЧ охватывают скоростной диапазон 800 ... 1800  $\text{мин}^{-1}$ . В этом рабочем диапазоне дизеля величину суммарного коэффициента  $K_{\Sigma}$  микроконтроллер определяет методом интерполяции по значениям опорных точек, которые приведены в табл. 3.

На начальной стадии переходного процесса незначительное падение частоты объясняется буксованием сцепления на протяжении 0,35 с. Нажатие на электронную педаль приводит к возрастанию задаваемого значения  $n_{\text{п}}$  частоты вращения. Микропроцессорный блок САРЧ реагирует на это действие увеличением значения  $\varphi_{\text{р}}^1$  – задаваемого положения вала исполнительного механизма. Во время переходного процесса положение вала исполнительного механизма в

относительных единицах изменялось от 20 до 53 %. Длительность переходного процесса составила 1,8 с. Суммарный корректирующий коэффициент  $K_{\Sigma}$  изменился от 0,4 до 1,0. Показатели переходного процесса соответствуют требованиям к регуляторам первого класса точности по ГОСТ 10511-83.

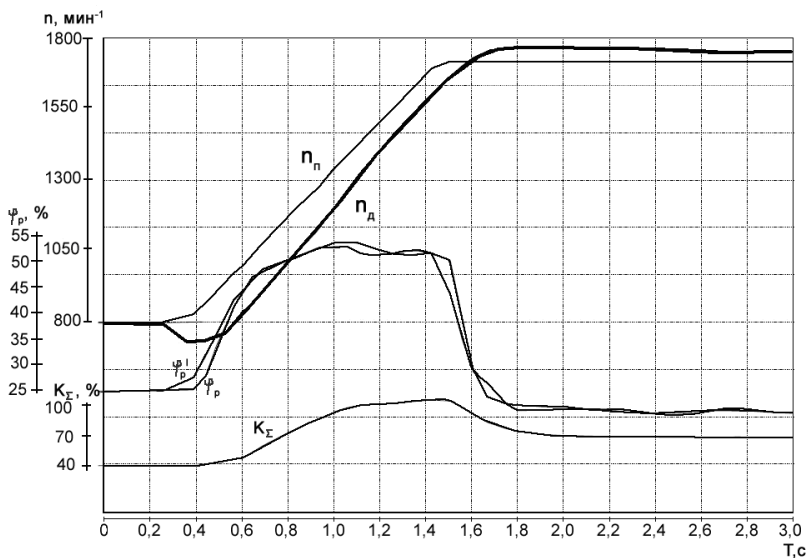


Рис. Переходные процессы в САРЧ дизеля 8Ч13/14 при включении и разгоне на первой передаче:  $n_{п}$  и  $n_{д}$  – заданная и фактическая частоты вращения;  $\varphi_{р}^1$  и  $\varphi_{р}$  – заданное и фактическое положение вала исполнительного механизма;  $K_{\Sigma}$  – суммарный корректирующий коэффициент

Эксплуатационные испытания на тракторе выявили и недостаток первичных настроек ПИД-регулятора. С увеличением частоты вращения коленчатого вала более  $1900 \text{ мин}^{-1}$  наблюдалось усиление колебаний на валу исполнительного механизма. Для устранения недостатка в диапазоне  $1800 \dots 2100 \text{ мин}^{-1}$  была применена дополнительная индивидуальная настройка изменением значений двух корректирующих коэффициентов. Первый коэффициент  $K_T$  отвечал за коррекцию в зависимости от температурного режима двигателя, второй коэффициент  $K_N$  – за коррекцию по нагрузке.

Проведенное испытание электронной САРЧ фирмы Heinzmann на дизеле 8Ч13/14 транспортного средства подтвердило правильность выбора опорных точек калибровочной матрицы ПИД-закона регули-

рования частоты вращения. Индивидуальная настройка САРЧ быстроходного дизеля осуществлялась подбором коэффициентов, которые отвечают за температурный режим двигателя и коррекцию по нагрузке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисовал А.А. Методика и результаты испытания микропроцессорного регулятора с программно-измерительным комплексом в его составе / А.А. Лисовал // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 1. – С. 15 – 19.

2. Лисовал А.А. Микропроцессорный регулятор частоты вращения дизеля / А.А. Лисовал, С.В. Кострица // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 49 – 54.

3. Лісовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизеля / А.А. Лісовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. – 2009. – №4. – С. 23 – 24.

4. Лісовал А.А. Автоматичне регулювання систем когенераційної установки на газовому паливі / А.А. Лісовал, М.Є. Нижник, В.С. Вербовський // Автоматика / Automatics-2013: Матеріали ХХ міжнародної конференції з автоматичного управління. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 248 – 249.