

УДК 621.436

*А.А. Лисовал, д-р техн. наук, А.В. Вербовский, асп.*

## ВСЕРЕЖИМНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДИЗЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

### Введение

Из теории и практики автоматического регулирования известны ПИД-регуляторы, где П – это пропорциональная, И – интегральная и Д – дифференциальная составляющие закона регулирования. Для стационарных и транспортных дизелей такие регуляторы применяют для систем автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) коленчатого вала дизеля. ПИД-регуляторы нашли широкое применение в электронных САРЧ. В Украине на дизелях колесных транспортных средств (КТС) ПИД-регуляторы стали применять и испытывать при переходе от механических и гидромеханических САРЧ к микропроцессорным.

### Публикации и постановка задачи

В предыдущих публикациях [1, 2] описана методика и этапы создания двухрежимной электронной САРЧ для автомобильного дизеля 4СН12/14 с пологими частичными характеристиками. Эти работы выполнены на кафедре «Двигатели и теплотехника» Национального транспортного университета совместно с Институтом газа НАН Украины. Основное внимание в публикациях отведено математическому моделированию экспериментальной САРЧ, дизелю с наддувом и созданию программного обеспечения [2, 3]. Математическая модель электронного блока не описывает режимы пуска и прогрева дизеля. В остальном она идентична программному обеспечению, которое было внесено в микроконтроллер серии PIC 16 фирмы Microchip.

В экспериментальном двухрежимном регуляторе был реализован ПИ-закон (пропорционально-интегральный) регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля с незначительной по величине интегральной составляющей и ПИ-закон регулирования положения выходного вала исполнительного механизма, который был соединен с рейкой ТНВД дизеля [4].

В продолжение работ по созданию электронного регулятора было поставлено задание – перейти к всережимному регулированию частоты

вращения и реализовать ПИД-закон регулирования.

В процессе создания и исследования всережимной микропроцессорной САРЧ для автотракторного дизеля возникла задача – правильно настроить коэффициенты П-, И- и Д-каналов усиления ПИД-регулятора для дизеля КТС, обосновать долю каждого в суммарном цифровом сигнале управления для исполнительного механизма. Для дизеля КТС необходимо осуществлять корректировку выбранных коэффициентов усиления для каналов ПИД-регулятора в зависимости от широкого скоростного диапазона работы автотракторного дизеля и величины внешней нагрузки.

Существующие зарубежные инструкции по настройке каналов ПИД-регуляторов для дизелей КТС включают рекомендации, которые направлены на механическое действие оператора и зависят от личного опыта и квалификации этого оператора.

**Цель работы** – обоснование и экспериментальное подтверждение способа настройки всережимного электронного ПИД-регулятора для автотракторного дизеля.

В отличие от двухрежимного электронного регулятора всережимная версия собрана на основе узлов фирмы Heinzmann. Для реализации ПИД-закона регулирования частоты вращения автотракторного дизеля выбран электронный блок управления Pandaros. Применена более совершенная конструкция исполнительного механизма [4], который присоединили к рейке ТНВД.

Объектами экспериментальных исследований электронной САРЧ были 6-ти и 8-ми цилиндровые двигатели ЯМЗ размерности S/D = 13/14 без наддува. Соответственно, исполнительные механизмы регуляторов на ТНВД развивали максимальные усилия 1,4 Н и 3,6 Н при угле поворота выходного вала 36 °.

### Стендовые испытания

Целью стендовых испытаний было определение коэффициентов для ПИД-регулятора по П-, И- и Д-каналам усиления входного сигнала частоты вращения коленчатого вала дизеля в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов работы дизеля.

Для настройки ПИД-регулятора использовали дизель-электрический агрегат АГД-100С-Т400-1Р с приводным дизелем 6Ч13/14. Дизель при 1500 мин<sup>-1</sup> развивал мощность 100 кВт. Внешнюю нагрузку создавали реостатами. Регулятор был настроен практически на астатическую регуляторную характеристику со степенью неравномерности 0,2 %.

Все операции по сбросу-набросу нагрузки, установившиеся процессы фиксировали при помощи цифровой записи.

Настройку ПИД-параметров начинали с режима холостого хода и далее проверяли в динамике при сбросе-набросе нагрузки. Правильность настройки и выбора коэффициентов усиления П-, И- и Д-каналов оценивали по известным показателям качества переходного процесса САРЧ дизеля (ГОСТ 10511-83): длительность переходного процесса, заброс частоты вращения, нестабильность частоты. Дополнительным показателем правильной настройки было принято – достижение при набросе нагрузки не более одного перерегулирования выходного вала исполнительного механизма.

При частоте 1500 мин<sup>-1</sup> приводного вала дизель-электрический агрегат и номинальной мощности были определены значения рациональных ПИД-параметров по соответствующим каналам: П – 15 %; И – 23 %; Д – 3 %. Возможная максимальная степень усиления по каждому каналу составляла 100 %.

В результате проведенных исследований было установлено, что при изменении выбранного рационального значения коэффициента усиления по П-каналу прямо пропорционально изменялись и рациональные значения двух других (И и Д) каналов, и наоборот. Это позволило выбранные рациональные ПИД-параметры при номинальном режиме пропорционально изменять с помощью введенного нами суммарного корректирующего коэффициента  $K_{\Sigma}$ . Расчетные значения суммарного корректирующего коэффициента  $K_{\Sigma}$  определяли по формуле:

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

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

Коэффициент  $K_{\Sigma}$  оказывал мультипликативное влияние на выбранные значения рациональных

ПИД-параметров. Значения корректирующих коэффициентов  $K_N$  и  $K_V$  на номинальном режиме дизель-электрического агрегата приняли за единицу.

Для определения значений корректирующих коэффициентов  $K_N$  по нагрузке и  $K_V$  по частоте вращения коленчатого вала для выбранных рациональных ПИД-параметров были проведены два этапа исследований:

– определение корректирующего коэффициента  $K_N$  при частоте вращения 1500 мин<sup>-1</sup> и при нагрузках на дизель с фиксированным шагом;

– определение корректирующего коэффициента  $K_V$  в режиме холостого хода с фиксированным шагом частоты вращения.

Результаты двух этапов исследований приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Таблица 1. Значение корректирующего коэффициента  $K_N$  при разных нагрузочных режимах

Коэффициент коррекции	Нагрузка на дизель, кВт					
	0	20	40	60	80	100
$K_N$	0,45	0,45	0,45	0,7	0,9	1,0

Таблица 2. Значение корректирующего коэффициента  $K_V$  в режиме холостого хода

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

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

Значения корректирующего коэффициента  $K_V$  в режиме холостого хода определяли на дизеле 8Ч13/14, который был установлен на колёсный трактор Т150К. С увеличением частоты вращения дизеля значения  $K_V$  возрастают.

Из полученных значений корректирующих коэффициентов  $K_N$  и  $K_V$  было рассчитано по формуле (1) значение суммарного корректирующего коэффициента  $K_{\Sigma}$ , общего для всего рабочего диапазона автотранспортного дизеля 8Ч13/14.

В табл. 3 приведен массив значений суммарного поправочного коэффициента  $K_{\Sigma}$ , который получен расчетно-экспериментальным способом.

Таблица 3. Значения суммарного корректирующего коэффициента  $K_{\Sigma}$  для дизеля 8Ч13/14

		Частота вращения, мин <sup>-1</sup>				
		900	1200	1500	1800	2100
Мощность, %	0	0,4	0,4	0,45	0,5	0,55
	20	0,4	0,4	0,45	0,5	0,55
	40	0,4	0,4	0,45	0,5	0,55
	60	0,65	0,65	0,7	0,8	0,85
	80	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1
	100	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2

Опорные точки, которые выделены в табл. 3 курсивом, были внесены в энергонезависимую память микроконтроллера ПИД-регулятора.

### Дорожные испытания

Для подтверждения правильности настроек ПИД-регулятора для КТС 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.

Дизель 8Ч13/14 отрегулирован на мощность 128,7 кВт при 2100 мин<sup>-1</sup> коленчатого вала. На дизеле был установлен ТНВД типа 80.05-30 с всережимным электронным регулятором частоты. Степень неравномерности внешней и частичных регуляторных ветвей была установлена 6 %.

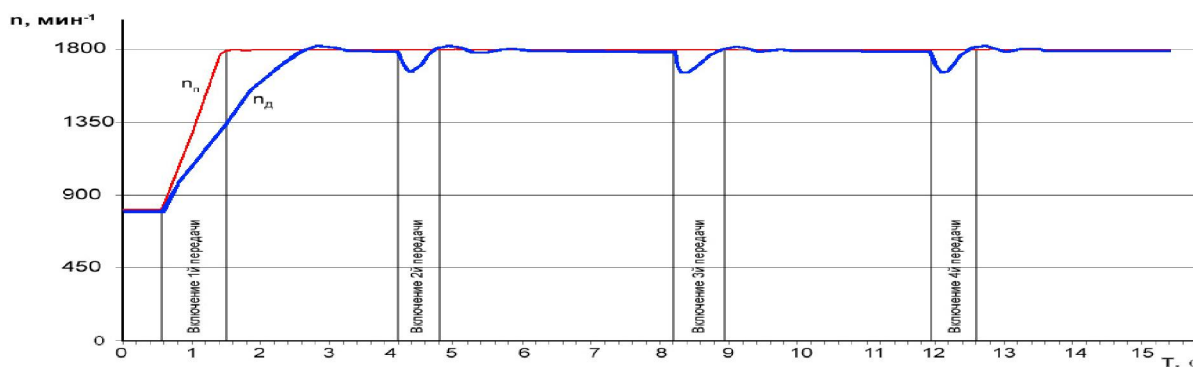


Рис. 1. Разгоны дизеля 8Ч13/14 с переключением передач на тракторе Т150К:  $n_n$  и  $n_d$  – задаваемая и фактическая частоты вращения коленчатого вала

Расчетные кривые  $n_n$  и  $\varphi_R^I$  – это тоже результаты цифровой записи, которые просчитывает микроконтроллер САРЧ без учета инерционности КТС и особенностей переключения передач. Результаты сопоставления фактических и расчетных значений электронной САРЧ будут далее учтены при математическом моделировании.

Полная масса трактора с установленным на нем дополнительным весом составляла 9400 кг. Габаритные размеры трактора: высота 3,19 м; ширина 2,4 м.

Коробка передач – механическая с гидравлическим управлением, переключаемая без разрыва потока мощности.

Испытания проводили на горизонтальном участке асфальтной дороги длиной 50 м. Разгон дизеля на тракторе производили на первой передаче с места на второй транспортной скорости с последующим переключением передач при движении до четвертой. Достигали максимальной скорости 12 км/ч.

Было выполнено 11 заездов в одном направлении. Проводили цифровую запись параметров САРЧ дизеля и трактора. Было выбрано 5 результатов, для которых разгон трактора до 12 км/час занял в среднем 30 м. На рис. 1 показана цифровая запись частоты вращения дизеля 8Ч13/14 при переключении передач. Выбранный график изменения частоты вращения наиболее совпадает с заездом на участке разгона трактора в 30 м.

На рис. 2 показан фрагмент обработанной цифровой записи переходных процессов в электронной САРЧ дизеля при включении и разгоне трактора на первой передаче.

Показанные на рис. 2 переходные процессы САРЧ охватывают скоростной диапазон 800...1800 мин<sup>-1</sup>. В этом рабочем диапазоне дизеля величины суммарных коэффициентов  $K_{\Sigma}$  микроконтроллер определяет методом интерполяции по значениям опорных точек, которые были приведенным в табл. 3.

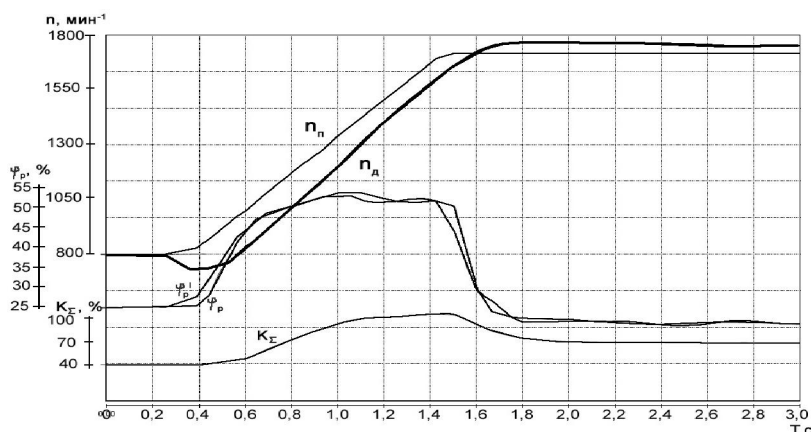


Рис. 2. Переходные процессы в САРЧ дизеля 8Ч13/14 на тракторе Т150К при включении и последующем разгоне на первой передаче:

$n_{п}$  и  $n_{д}$  – задаваемая и фактическая частоты вращения коленчатого вала;  $\varphi_{р}^1$  и  $\varphi_{р}$  – задаваемое и фактическое положения вала исполнительного механизма в относительных единицах;  $K_{\Sigma}$  – суммарный корректирующий коэффициент настройки ПИД-регулятора

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  $n_{п}$  частоты вращения. Микропроцессорный блок САРЧ реагирует на это увеличением задаваемого значения  $\varphi_{р}^1$  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 1-ому классу точности по ГОСТ 10511-83.

#### Выводы

Применение всережимного электронного ПИД-регулятора частоты вращения коленчатого вала для дизеля КТС требует настройки П-, И- и Д-каналов усиления и корректировки этих настроек в зависимости от скоростного и нагрузочного режимов эксплуатации.

Дорожные испытания электронной САРЧ подтвердили правильность выбора коэффициентов  $K_{\Sigma}$  для опорных точек калибровочной матрицы ПИД-закона регулирования частоты вращения автотракторного дизеля.

#### 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 дизеля и расчёт цикловой подачи топлива / А.А. Лисовал, С.В. Кострица, А.В. Вербовский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 58–61.
3. Лисовал А.А. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования дизеля / А.А. Лисовал, С.В. Кострица, А.В. Вербовский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 64–69.
4. Лисовал А.А. Виконавчі механізми для електронних регуляторів паливних насосів високого тиску дизеля / А.А. Лисовал, С.В. Костриця, О.В. Вербовський // Автошляховик України. – 2009. – №4. – С. 23–24.

#### Bibliography (transliterated):

1. Lisoval A.A. Metodika i rezul'taty ispytaniya mikroprocessornogo reguljatora s programmno-izmeritel'nym kompleksom v ego sostave / A.A. Lisoval // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2007. – № 1. – S. 15–19.
2. Lisoval A.A. Mikroprocessornyj reguljator dizelja i raschjot ciklovoj podachi topliva / A.A. Lisoval, S.V. Kostrica, A.V. Verbovskij // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2010. – № 2. – S. 58–61.
3. Lisoval A.A. Proverka adekvatnosti matematicheskoj modeli sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya dizelja / A.A. Lisoval, S.V. Kostrica, A.V. Verbovskij // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2011. – № 2. – S. 64–69.
4. Lisoval A.A. Vikonavchi mehanizmi dlja elektronnih reguljatoriv palivnih nasosiv visokogo tisku dizelja / A.A. Lisoval, S.V. Kostricja, O.V. Verbovskij // Avtošljahovik Ukraïni. – 2009. – №4. – S. 23–24.