

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АСУ "ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ"

В настоящее время ведущие производители двигателей, такие, как фирмы SULZER и MAN-B&W применяют аккумуляторные топливные системы высокого давления с электронным управлением впрыском в малооборотных дизелях (МОД). Кроме того, ими заявлено, что начиная с 2012 года будет прекращен выпуск дизелей с традиционной системой впрыска топлива.

Например, в системе управления впрыском топлива двигателя RT-Flex96С фирмы SULZER отсутствует распределительный вал, что достигается за счет применения электронно-гидравлической системы управления впрыском, достоинством которой является возможность формирования алгоритма с широким диапазоном изменения параметров (задание угла опережения с высокой точностью).

Однако, в процессе эксплуатации существующей электронно-гидравлической системы управления были выявлены недостатки, которые приводят к уменьшению точности управления углом впрыска топлива и изменению количества подаваемого топлива [1, 2].

Предложенная в [3] замена электро-гидравлического привода на пьезоэлектрический позволяет увеличить пусковой момент и повысить надежность работы системы впрыска топлива. Однако в предложенных конструкциях размеры пьезоэлектрических столбов достигают 45 см при массе 8,5 кг. Для уменьшения линейных размеров была разработана конструкция привода (рис. 1), сочетающего в себе пьезопривод и гидравлику [4]. Для оценки работоспособности такой конструкции составлена структурная схема и получена математическая модель пьезоэлектрического привода.

Для расчета момента пьезоэлектрического двигателя уточнены геометрические размеры воспринимающего поршня блока управления подачи топлива в цилиндр. Диаметр составляет  $d_{ш} = 28$  мм, а его ход  $h = 4$  мм. Давление масла управления  $P$  в используемой гидравлической системе 20 МПа.

Площадь поперечного сечения,  $m^2$ ,

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} = 6,154 \cdot 10^{-4}.$$

Усилie, которое необходимо приложить, Н,

$$F_1 = PS_1 = 200 \cdot 10^5 \cdot 6,154 \cdot 10^{-4} \approx 12300.$$

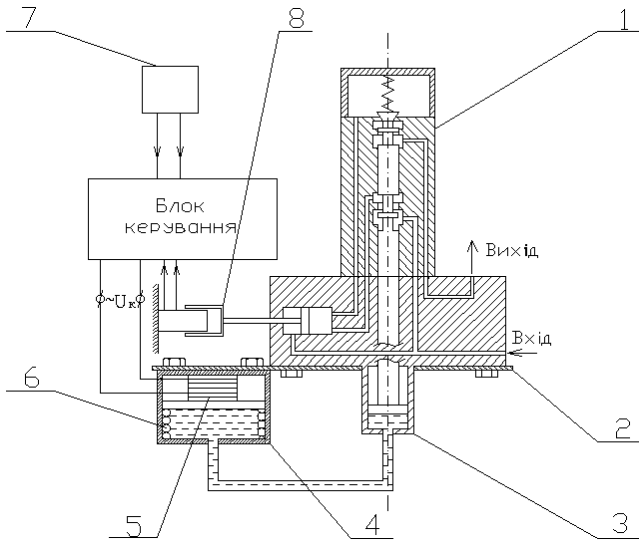


Рис. 1. Конструкція блока управління подачею палива в циліндр з пьезоприводом: 1 – блок управління подачею палива; 2 – основа; 3 – воспринимаючий гидроциліндр; 4 – задаючий гидроциліндр; 5 – наборний стовб пьезоелектричних шайб; 6 – пружина попереднього нагрюження; 7 – датчик кількості вприснутого палива; 8 – датчик положення коленчатого вала

Переміщення меншого поршня на 4 мм змінить об'єм порожнини масла на  $V_1 = S_1 \cdot h = 2,45 \text{ см}^3$ . Следователно, змінення об'єму  $V_2$  порожнини масла под більшим поршнем должно быть таким же. Ход поршня більшого діаметра зададим 0,18 мм, діаметр ведучого гидроцилиндра  $d_2 = \sqrt{4V_1/(\pi \cdot h_2)} = 13,2 \text{ см}$ , тогда площа поперечного сечення цилиндра більшого діаметра  $S_2 = 136,8 \text{ см}^2$ . Сила, которую необходимо приложить к поршню більшого діаметра  $F_2 = F_1 \cdot S_2/S_1 = 273 \text{ кН}$ .

Для стовба пьезопривода был выбран материал PZT 5A [5] параметрами, приведенными в табл. 1.

Коеффициент упругости  $K_y$  равен  $1,599 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ , коєффициенты прямого и обратного пьезоєффекта  $K_p$  и  $K_{pi}$  равны 49,235 Н/В, масса наборного стовба  $m$  равна 2,96 кг.

Так как усилие, развиваемое манипулятором, 78 кН, то необходимо использовать четыре стовба соединенные параллельно (табл. 2).

Таблица 1

Параметры пьезоэлектрического материала PIC 255

Параметр	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7800
Относительная диэлектрическая проницаемость	1750
Пьезомодуль, Кл/Н	400·10 <sup>-12</sup>
Коэффициент электромеханической связи	0,69
Модуль Юнга, Н/м <sup>2</sup>	10·10 <sup>10</sup>
Механическая добротность	80
Соппротивление, Ом	50
Коэффициент демпфирования, кг/см <sup>2</sup>	8,9·10 <sup>-3</sup>

Таблица 2

Параметры наборного столба модели P-056.90

Параметр	Значение
Перемещение, м	180·10 <sup>-6</sup>
Диаметр, м	0,056
Длина, м	0,154
Усилие, Н	78000
Электрическая ёмкость, Ф	2,7·10 <sup>-3</sup>
Частота резонанса, Гц	7

На рис. 3 представлена структурная схема блока управления подачи топлива с пьезоприводом, которая составлена на основе структурной схемы активного упругого компенсатора, выполненного из пьезоэлектрического материала [6].

Сворачивание структуры приводит к следующей передаточной функции пьезостолба с блоком управления подачей топлива, управляемого от источника ЭДС,

$$W_{\Delta}(p) = \frac{K_1 K_{\text{он}}}{R_{\text{ан}} C_1 m_{\Sigma} p^3 + (m_{\Sigma} + R_{\text{ан}} C_1 K_{\text{а}}) p^2 + (R_{\text{ан}} C_1 K_{\text{а}} + K_{\text{а}} + R_{\text{ан}} C_1 K_{\text{с1}} + R_{\text{ан}} C_1 K_{\text{д}} + R_{\text{ан}} C_1 K_{\text{с2}} K_{\text{он}}) p + K_{\text{с}} + K_{\text{с1}} + K_{\text{он}} K_{\text{с2}}}$$

При подстановке значений получим передаточную функцию

$$W_{\Delta}(p) = \frac{1094}{3,105 \cdot 10^{-3} p^3 + 2,95 p^2 + 1,8 \cdot 10^6 p + 1,599 \cdot 10^9}$$

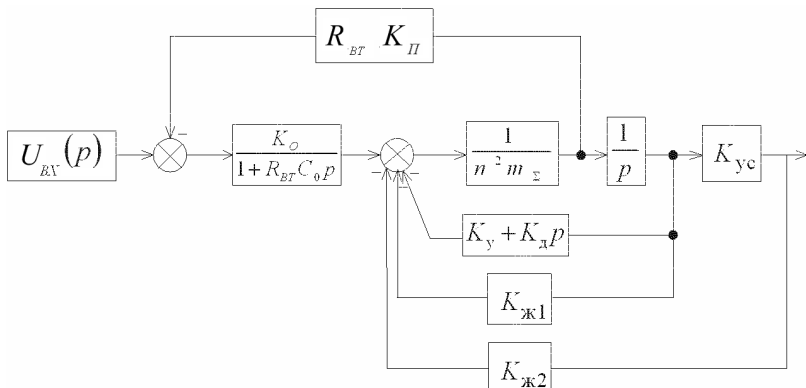


Рис. 3. Модель блока управления подачи топлива в цилиндр с пьезоприводом:  $U_{вх}(p)$  – управляющее напряжение;  $K_o$  – коэффициент обратного пьезоэффекта;  $K_{п}$  – коэффициент прямого пьезоэффекта;  $R_{вт}$  – внутреннее сопротивление пьезостолба;  $C_o$  – емкость пьезостолба;  $m_{\Sigma}$  – эквивалентная приведенная суммарная масса подвижных частей;  $K_{ус}$  – коэффициент усиления воздействия пьезостолба;  $K_y$  – коэффициент упругости пьезостолба;  $K_d$  – коэффициент внутреннего демпфирования пьезостолба;  $K_{ж1}$  – коэффициент жесткости пружины предварительного нагружения;  $K_{ж2}$  – коэффициент жесткости пружины золотника

По полученной передаточной функции в среде MathCad можно получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и реакцию на единичное ступенчатое воздействие (рис. 4, 5).

Анализ зависимостей показал, что при использовании данной конструкции можно получить требуемое перемещение при необходимом усилии, не превысив современных требований по времени переходного процесса, которое составило 6 мс при требуемых 6,5 мс. Кроме того, линейность АЧХ в диапазоне частот от 0 до 100 Гц говорит о возможности использования данной конструкции на судовых дизелях с частотой вращения до 6000 мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, предложенная система управления впрыском топлива позволяет сократить количество трубопроводов, исключив масляные насосы и, соответственно, повысить безопасность управления судовой энергетической установкой.

Однако, дальнейшее уменьшение габаритных размеров привода на столбах при одновременном исключении гидравлики не представляется возможным в настоящее время. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение возможностей использования вентильных электродвигателей и роторных пьезодвигателей.

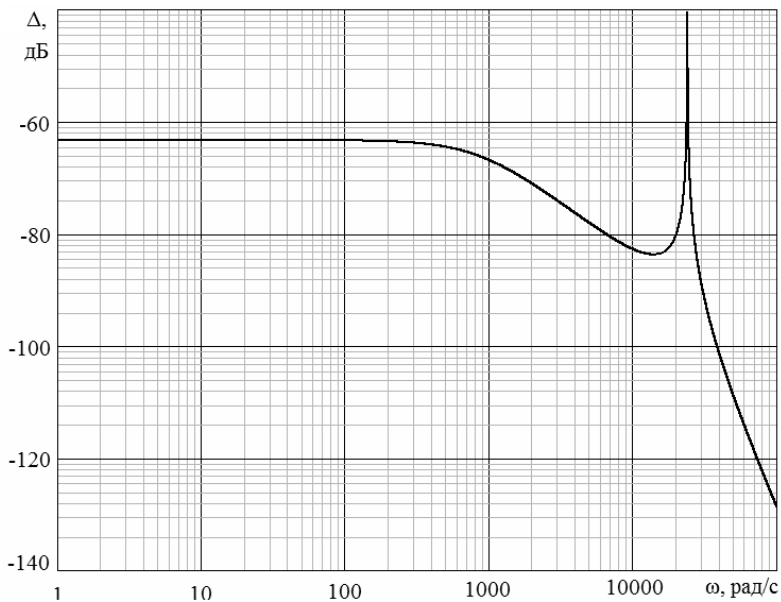


Рис. 4. ЧХ модели наборного столба пьезокерамических шайб

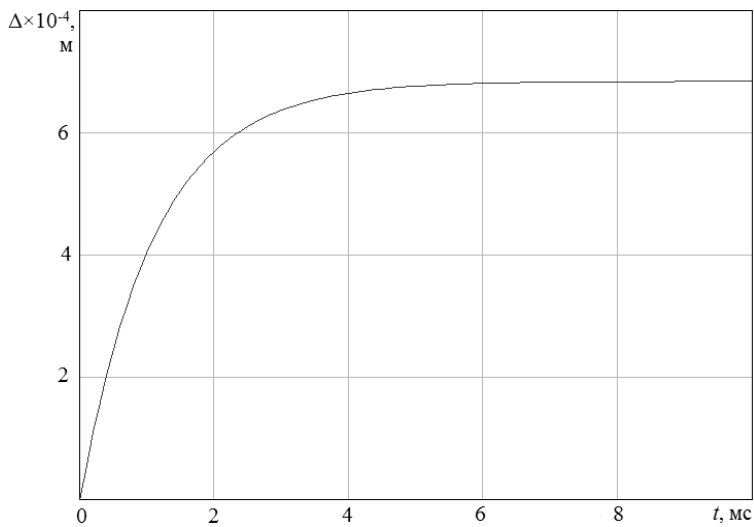


Рис. 5. Реакция модели наборного столба пьезокерамических шайб на единичное ступенчатое воздействие

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оженко Е.М. Повышение надежности АСУ "интеллектуального двигателя" [Текст] / Е.М. Оженко, В.В. Никольский, В. С. Михайленко. – Автоматика – 2008: труды междунар. конф. – Том 1. – Одесса: ОНМА. – 2008. – С. 233 – 234.
2. Оженко Е.М. Повышение надежности АСУ "интеллектуального двигателя" [Текст] / Е.М. Оженко, В.В. Никольский. – Датчики, приборы и системы – 2009: труды междунар. конф. – Черкассы: Информация. – 2009. – С. 42 – 44.
3. Горб С.И. Оценка возможности применения пьезоэлектрического привода для клапана малооборотного дизеля [Текст] / С.И. Горб, В.В. Никольский, А.В. Хименко, О.В. Глазева. – Автоматизация судовых технических средств: науч. техн. сборник – Вып. 11. – Одесса: ОНМА. – 2006. – С. 42 – 47.
4. Никольский В.В. Система управління подачею палива "інтелектуального" двигуна [Патент на корисну модель] / В.В. Нікольський, Є.М. Оженко. – МПК (2009) G01N11/10. – № 43426; Опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
5. Piezoelectric Ceramics, Piezo Actuators, Piezo Motors, PZT Ceramics, Piezo Assemblies, Piezo Transducer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.piceramic.de/>
6. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами [Текст]: монография / А.А. Никольский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.