

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СТАБИЛЬНОСТЬ СИСТЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ИНЖЕКТОРОВ COMMON RAIL

Д.А. Жданко,

проректор по учебной работе и производству БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.А. Шецко,

начальник ремонтной мастерской ООО «ЭКСПРЕССДИЗЕЛЬ», инженер

О.О. Мухля,

аспирант БГАТУ

В статье приведены исследования изменения стабильности пульсаций давления в топливном рейле системы COMMON RAIL в зависимости от изменяемой частоты главного привода и объема топливного рейла (аккумулятора давления), применяемого при тестировании на стенде. В качестве параметра, характеризующего стабильность системного давления, используется длительность затухающих пульсаций давления в рейле после срабатывания форсунки. Получена модель, которая позволила определить оптимальные значения частоты вращения привода топливных насосов высокого давления (ТНВД) и объема рейла.

Ключевые слова: диагностика, стенд, топливная система, топливный насос высокого давления, инжектор, электродвигатель, давление, рейл, датчик давления, пульсация, модернизация.

The article presents studies of changes in the stability of pressure pulsations in the fuel rail of the COMMON RAIL system depending on the variable frequency of the main drive and the volume of the fuel rail (pressure accumulator) used in stand testing. As a parameter characterizing the stability of system pressure, the duration of damped pulsations of pressure in the rail after nozzle activation is used. The model has been obtained, which allowed to determine the optimal values of the drive speed of high-pressure fuel pumps (HPFP) and the volume of the rail.

Key words: diagnostics, stand, fuel system, high-pressure fuel pump, injector, electric motor, pressure, rail, pressure sensor, pulsation, modernization.

Введение

Развитие мирового автомобилестроения приводит к росту количества транспортных средств, работающих на дизельных двигателях, что представляет серьезную проблему для экологического состояния нашей планеты. В этой связи ученые и инженеры уделяют большое внимание решению данных вопросов путем компромисса и сбалансированностью между экологией и функциональными возможностями силовых установок. Ведутся также работы по совершенствованию оборудования для тестирования компонентов таких силовых установок – инжекторов и топливных насосов высокого давления [1-7].

Аккумуляторная топливоподающая система дизельного двигателя представляет собой сложную наукоемкую структуру, как в разработке и производстве, так и в эксплуатации.

В настоящее время имеется достаточное количество стендов для тестирования инжекторов и ТНВД COMMON RAIL (CR) [3]. Как правило, их производят компании, которые обеспечивают инжекторами

сборочные конвейеры мировых производителей транспортных средств, сельскохозяйственных, строительных и специальных машин – EPS 708 (BOSCH), CRI-PC (HARTRIDGE-DELPHI). Стоимость данного оборудования зачастую превышает ~50-100 тыс. евро.

Существует много вариантов дооснащения и модернизации уже имеющихся стендов предыдущих поколений, которые еще довольно успешно справляются с поставленными задачами (поддерживают заданную температуру тестовой жидкости, частоту вращения главного привода, точно отсчитывают необходимое количество циклов). Используя необходимые блоки управления и блоки измерения, можно достигнуть положительного экономического эффекта без ущерба качеству работ по тестированию компонентов дизельной топливной системы (ДТС) CR [3-6].

Вопросы проектирования, расчета и методы исследования процессов топливоподачи современных аккумуляторных систем рассматривались в научных трудах МГТУ им. Баумана, МАДИ, МАМИ, БНТУ, БГАТУ, БашГАУ, Южно-Уральского ГУ, Владимир-

ского ГУ, ХНАДУ, концернами «ЯЗДА», «АЗПИ», «Bosch», «Denso», «Delphi», «Siemens», «Caterpillar» и многих других. Это нашло отражение в работах ученых – Р.М. Баширова, А.Н. Врублевского, И.И. Габитова, В.П. Миклуша, Л.В. Грехова, Л.Н. Голубкова, П.В. Душкина, М.В. Мазинга, А.В. Неговора, Ф.И. Пинского, Ю.Д. Погуляева, Г.Г. Тер-Мкртчяна, А.А. Прохоренко, П.В. Курманова и других [1-4].

Цель данной статьи – исследование факторов, влияющих на изменения стабильности пульсаций давления в топливном рейле системы COMMON RAIL в зависимости от изменяемой частоты главного привода и объема, применяемого при тестировании на стенде топливного рейла (аккумулятора давления).

Объект исследования – топливная система COMMON RAIL дизельного двигателя.

Оборудование и материалы

Испытания проводились на стенде SPP-SPOLNOTA-1 (Польша) (рис. 1), модернизированном до уровня тестирования системы CR, с использованием блока управления «ПОТОК CR4», блока измерения «ПОТОК FM8» (Беларусь), измененной системы термостабилизации и фильтрации тестового масла. На стенде были установлены топливные фильтры высокой степени очистки, дополнительные радиаторы с управляемыми вентиляторами и топливный насос для создания специального прокачиваемого дополнительного контура охлаждения, асинхронный двигатель 11кВт и управляющий им частотный преобразователь 11кВт. Произведены работы по электромагнитной совместимости системы электрообеспечения стенда путем установки сетевого дросселя 11 кВт.

В качестве тестовых использовались – грузовой инжектор № 0445124015, ТНВД СР1НЗ (BOSCH) (рис. 2) и три топливных рейла с разными внутренними объемами (12,5 мл; 19 мл; 25,5 мл) (рис. 3).

Изменяемыми факторами эксперимента являлись: частота вращения ТНВД и объем нагрузочного рейла (аккумулятора давления), величину которых регулировали путем изменения настроек блока управления и переустановкой имеющихся рейлов. Запись осциллограмм пульсаций давления производили блоком управления «ПОТОК CR-4». Данные принимаемых режимов испытаний представлены в таблице 1.

Для обработки данных и построения графиков использовались программы – Microsoft Excel, для статистических и математических расчетов – STATISTICA и MATHCAD.

Основная часть

Для решения экспериментальной задачи проводился полный факторный эксперимент [8-9], план которого представлен в таблице 1.

Для упрощения работы с экспериментальными данными полученные результаты предварительно обрабатывали. Применяли операцию оптимальной дискретной фильтрации [10] (свертка с импульсной характеристикой оптимального фильтра) к осциллограмме давления.

$$PF_i := \left[\sum_{j=0}^{Nflt-1} (Fltr_j \cdot P_{i+j}) \right], \quad (1)$$

где $Nflt$ – длина импульсной характеристики фильтра (принимается равной 86)

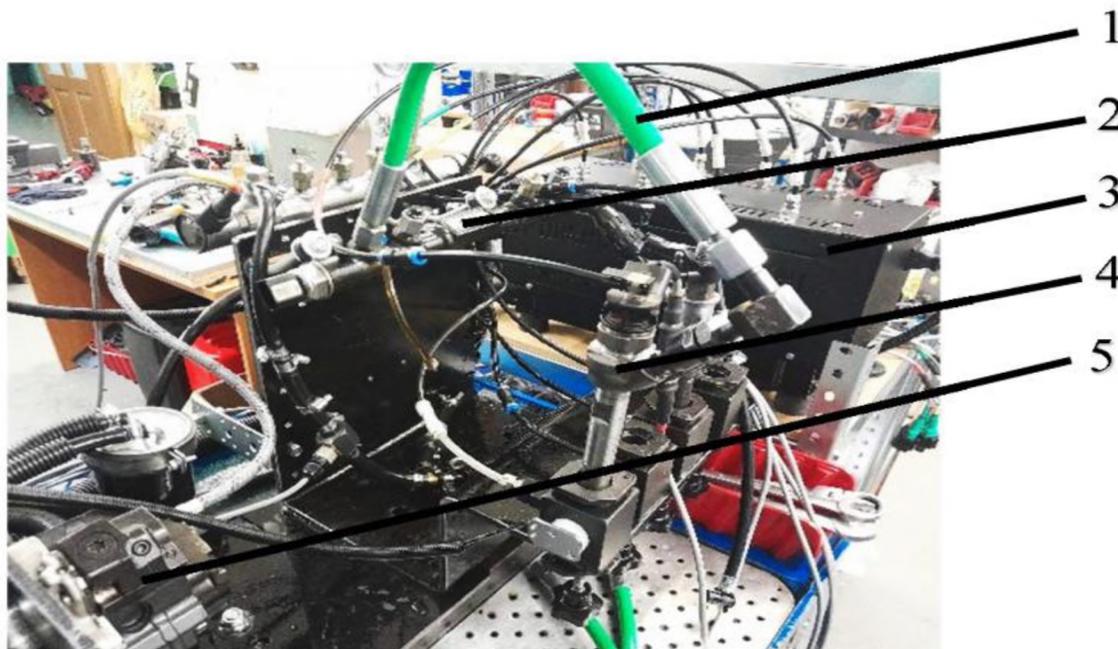


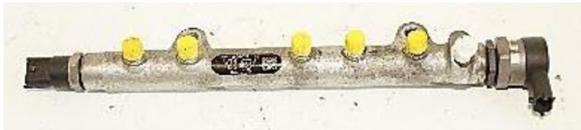
Рисунок 1. Модернизированный стенд SPP-SPOLNOTA-1: 1 – тестовый трубопровод высокого давления «рейл-инжектор»; 2 – испытуемый рейл; 3 – безмензурочная система измерения производительности инжектора «ПОТОК FM-8»; 4 – тестовый инжектор; 5 – тестовый ТНВД



Рисунок 2. Используемый ТНВД СР1НЗ



а



б



в

Рисунок 3. Используемые рейлы: а – V = 12,5 мл; б – V = 19 мл; в – V = 25,5 мл

Таблица 1. Факторный план эксперимента

№ опыта (j)	X ₁ (v)	X ₂ (V)	X ₁ (v), частота вращения привода, мин ⁻¹	X ₂ (V), объем рейла, мл	Количество повторений (выборок)
1	-1	-1	500	12,5	10
2	+1	-1	1000	12,5	10
3	-1	+1	1500	25,5	10
4	+1	+1	500	25,5	10
5	0	0	1000	19	10
6	-1	0	1500	19	10
7	+1	0	500	19	10
8	0	-1	1000	12,5	10
9	0	+1	1500	25,5	10

$$Nflt = T/dt, \quad (2)$$

где T – период колебаний давления топлива;

dt – дискретность отсчетов по времени;

Fltr_j – импульсная характеристика оптимального фильтра;

P_{i+j} – отсчеты исходной осциллограммы давления.

$$Fltr_i := \frac{1}{Nflt} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{Nflt} \cdot j\right), \quad (3)$$

где j – номер отсчета.

В итоге получили сигнал, более пригодный для расчета длительности пульсаций (рис. 4).

После этого провели серию испытаний согласно таблице 1. Полученные данные приведены в таблице 2.

Для проведения регрессионного анализа использовалась программа STATISTICA. Результаты анализа представлены на рисунке 5.

Регрессионный анализ показал, что на длительность пульсаций давления в рампе влияют факторы: x₁, x₂, x₁², x₂², x₁·x₂, x₁²·x₂², x₁²·x₂, x₀²·x₂².

Уравнение регрессии, описывающее математическую модель зависимости длительности пульсаций давления от частоты вращения ТНВД и объема рейла, имеет вид:

$$y = 90,3790 - 0,1250 \cdot x_1 + 0,0541783 \cdot 10^{-3} \times x_1^2 - 7,1812 \cdot x_2 + 0,1663 \cdot x_2^2 + +0,1020 \cdot 10^{-3} \times x_1 \cdot x_2 - 0,2073 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,4129 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 0,7840 \cdot 10^{-7} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2, \quad (4)$$

где x₁ – фактор частоты вращения привода ТНВД;

x₂ – фактор объема рейла;

y – зависимая переменная длительности пульсаций давления.

Визуализация модели зависимости длительности пульсаций давления от частоты вращения ТНВД и объема рейла в виде трехмерной поверхности представлена на рисунке 6.

Используя полученную модель, определим при каких уровнях факторов можно получить минимальную длительность пульсаций давления в рейле. Найдем частные производные функции (3) по x₁ и x₂:

$$\frac{dy}{dx_1} = 0,1084 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,1020 \cdot 10^{-1} \cdot x_2 +$$

$$+ 0,1568 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,2073 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 -$$

$$- 0,8259 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,1250;$$

$$\frac{dy}{dx_2} = 0,1020 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 + 0,3325 \times$$

$$\times x_2 + 0,1568 \cdot 10^{-6} \cdot x_2 \cdot x_1^2 - 0,4129 \times$$

$$\times 10^{-5} \cdot x_2^2 - 0,4147 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 - 7,1812. \quad (5)$$

Приравняем полученные выражения к нулю и решим систему уравнений:

$$0,1084 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,1020 \cdot 10^{-1} \cdot x_2 + 0,1568 \times$$

$$\times 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,2073 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 - 0,8259 \cdot 10^{-5} \times$$

$$\times x_1 \cdot x_2 - 0,1250 = 0;$$



Рисунок 4. Пульсации до и после использования фильтра

Таблица 2. Результаты испытаний

j	X ₁ (v)	X ₂ (V)	X ₁ (v), об ⁻¹	X ₂ (V), мл	t ₁ , мс	t ₂ , мс	t ₃ , мс	t ₄ , мс	t ₅ , мс	t ₆ , мс	t ₇ , мс	t ₈ , мс	t ₉ , мс	t ₁₀ , мс
1	-1	-1	500	12,5	15,36	15,32	15,34	15,39	15,39	15,31	15,36	15,34	15,40	15,30
2	1	-1	1500	12,5	15,11	15,17	15,08	15,19	15,13	15,10	15,02	15,15	14,93	15,08
3	-1	1	500	25,5	15,48	15,54	15,40	15,45	15,56	15,51	15,44	15,60	15,37	15,47
4	1	1	1500	25,5	15,54	15,57	15,53	15,57	15,46	15,53	15,53	15,57	15,52	15,54
5	0	0	1000	19	11,94	11,99	12,01	11,90	11,85	11,90	12,01	11,99	11,93	12,02
6	-1	0	500	19	11,94	11,97	11,92	11,95	11,94	11,94	11,98	11,90	11,98	11,92
7	1	0	1500	19	13,98	14,06	13,95	13,97	14,03	14,02	13,96	13,90	13,91	14,00
8	0	-1	1000	12,5	11,52	11,46	11,50	11,60	11,57	11,52	11,47	11,56	11,53	11,47
9	0	1	1000	25,5	15,54	15,52	15,49	15,62	15,51	15,49	15,58	15,56	15,55	15,53

Фактор	Регрессия; R-кв.=,99913;Скор.,99905 (ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА St _a) 2 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн. SS=,0026293 ЗП Тдлит,мс					
	Регрес. Козф.	Ст.Ош.	t(81)	p	-95, % Дов.Пред	+95, % Дов.Пред
Сред/Св.член	90,3789718583	0,698607	129,3703	0,0000000000	88,98896	91,76898
(1)Частота, об(L)	-0,1250047630	0,001587	-78,7875	0,0000000000	-0,12816	-0,12185
Частота, об(K)	0,0000541783	0,000001	69,0024	0,0000000000	0,00005	0,00006
(2)Объём,мл(L)	-7,1811927179	0,078237	-91,7879	0,0000000000	-7,33686	-7,02553
Объём,мл(K)	0,1662503598	0,002049	81,1414	0,0000000000	0,16217	0,17033
1L на 2L	0,0102012750	0,000178	57,4126	0,0000000000	0,00985	0,01055
1L на 2K	-0,0002073477	0,000005	-44,5598	0,0000000000	-0,00022	-0,00020
1K на 2L	-0,0000041293	0,000000	-46,9604	0,0000000000	-0,00000	-0,00000
1K на 2K	0,0000000784	0,000000	34,0562	0,0000000000	0,00000	0,00000

Рисунок 5. Коэффициенты для построения уравнения регрессии

$$0,1020 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 + 0,3325 \cdot x_2 + 0,1568 \cdot 10^{-6} \times \\ \times x_2 \cdot x_1^2 - 0,4129 \cdot 10^{-5} \cdot x_2^2 - 0,4147 \cdot 10^{-3} \times \\ \times x_1 \cdot x_2 - 7,1812 = 0. \quad (6)$$

Для решения системы уравнений использовали программу MATHCAD. Среди полученных решений рассмотрим только действительные и неотрицательные:

$$x_1 = 1990,7276 \text{ мин}^{-1}; x_2 = 25,2244 \text{ мл}$$

$$x_1 = 932,6798 \text{ мин}^{-1}; x_2 = 15,3274 \text{ мл}$$

Согласно модели (4), длительность пульсаций составила:

$$y = 15,403 \text{ мс};$$

$$y = 11,272 \text{ мс}.$$

После проведения расчетов получены результаты минимальной длительности пульсаций, которые составляют 11,272 мс, при частоте вращения ТНВД – 932,6798 мин⁻¹ и объеме рейла – 15,3274 мл.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. На стабильность системного давления в рейле влияют такие факторы, как частота вращения привода ТНВД и объем самого рейла. В качестве параметра, характеризующего стабильность системного давления, используется продолжительность затухающих пульсаций давления в рейле после срабатывания инжектора.

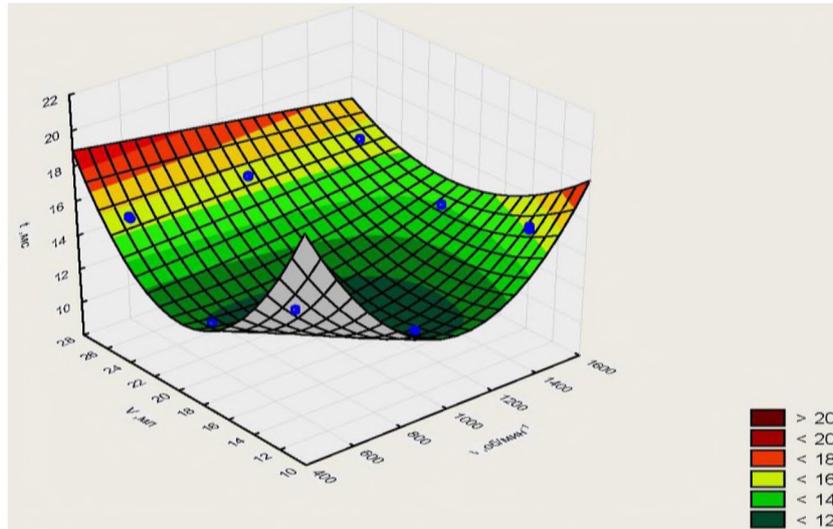


Рисунок 6. Модель зависимости длительности пульсаций давления от частоты вращения ТНВД и объема рейла

2. Получена модель, которая позволила определить оптимальные значения частоты вращения привода ТНВД и объема рейла (минимальная длительность пульсаций – 11,272 мс при частоте вращения ТНВД – 932,6798 мин⁻¹ и объеме рейла – 15,3274 мл), которые позволят проектировать стенды для тестирования инжекторов CR для более стабильного системного давления при тестировании и выполнении большего количества тестов за единицу времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
2. Жданко, Д.А. Оценка технического состояния форсунок топливной системы COMMON RAIL на примере трактора «БЕЛАРУС» с двигателем Д-243,5S3B / Д.А. Жданко, О.О. Мухля // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 34-39.
3. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники: монография / В.П. Миклуш [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.
4. Мухля, О.О. Оценка зависимости пульсаций давления топлива от частоты вращения привода стенда и собственной частоты впрысков тестируемого инжектора / О.О. Мухля, Д.А. Жданко, С.А. Шецко // Агропанорама. – 2023. – № 2 (156). – С. 23-31.
5. Мухля, О.О. Модернизация диагностического стенда ДД 10-01 для работы с ТНВД аккумуляторных

систем COMMON RAIL / О.О. Мухля, К.А. Веллер, В.Е. Тарасенко // Материалы науч.-практич. конф. студентов и магистрантов, Минск, 22-24 мая 2019 г. / Бел. гос. агр. техн. ун-т; редкол. А.В. Миранович [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 17-21.

6. Тарасенко, В.Е. Этапы совершенствования конструкции диагностического стенда для работы с инжекторами аккумуляторных систем COMMON RAIL / В.Е. Тарасенко // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: сборник науч. трудов по материалам XIII Междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 70-летию каф. надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО «Новосибирский ГАУ». – Новосибирск: НГАУ «Золотой колос», 2021. – С. 156-161.

7. Жданко, Д.А. Оценка технического состояния форсунок топливной системы COMMON RAIL / Д.А. Жданко // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: сборник науч. трудов по материалам XIII Междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 70-летию каф. надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО «Новосибирский ГАУ». – Новосибирск: НГАУ «Золотой колос», 2021. – С. 103-105.

8. Планирование эксперимента: практ. рук. / К.В. Щурин [и др.]. – Барановичи: БарГУ, 2022. – 260 с.

9. Леонов, А.Н. Основы научных исследований в примерах и задачах: учеб.-методич. пособие / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис; под ред. А.Н. Леонова. – Минск: БГАТУ, 2013. – 136 с.

10. Гутников, В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1990. – 192 с.

ПОСТУПИЛА ВРЕДАКЦИЮ 17.05.2024