

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ДАВЛЕНИЯ ВПРЫСКА ТОПЛИВА СИСТЕМЫ COMMON RAIL
Иванов В.А., Семенов А.В., Гаврилов В.Н., Новиков А.М., Волхонов М.С.**

Реферат. В инженерной практике наиболее эффективными методами оценки показателей надежности и определения ожидаемых технико-экономических показателей, с учетом технического уровня совершенствования системы питания дизелей, считают прогнозирование. Решение подобных задач требует описания изменения параметров объектов в различные моменты времени. Цель исследований – прогнозирование возможных значений давления впрыска топлива системы Common Rail на ближайшую перспективу для своевременного создания условий эксплуатации, проведения обслуживающих и ремонтных мероприятий. Для прогнозирования изменения давления впрыска топлива в системе питания дизеля использовали статистический метод. Методика прогноза включала этапы анализа исходной информации, выбора аналитической зависимости изменения рассматриваемого параметра в прошлом, экстраполяции полученной зависимости на прогнозируемый период и оценки результатов. Выбор аналитических зависимостей изменения оценочного значения давления осуществляли методом наименьших квадратов. Степень связи между рассматриваемой аналитической зависимостью и линией, построенной по исходным данным, определяли по величине коэффициента корреляции. Поскольку технико-экономические и экологические требования ужесточаются, растут требования к системе питания двигателей внутреннего сгорания, что вызывает необходимость повышения функциональных возможностей топливной аппаратуры – в первую очередь по величине давления впрыска топлива. В работе рассматриваются результаты прогнозной оценки возможных значений давления впрыска топливной системы Common Rail. Результаты исследования позволяют прогнозировать увеличение давления впрыска топлива системы Common Rail к 2026 г. до 300 МПа. Для обеспечения высоких показателей технической готовности предприятий технического сервиса дизельной топливной аппаратуры необходимо учитывать возможные изменения значений давления впрыска топлива в будущем.

Ключевые слова: дизельный двигатель, давление впрыска, прогнозная оценка.

Введение. На ближайшую перспективу дизельные двигатели рассматривают как наиболее эффективные двигатели внутреннего сгорания по топливной экономичности. Качество их рабочего процесса в основном зависит от того, как и когда подается топливо, и под каким давлением оно впрыскивается в камеру сгорания. Все процессы происходят под действием топливного насоса высокого давления (ТНВД), который дозирует топливо по цилиндрам [1, 2].

Традиционные системы питания дизелей с механическим регулированием не в полной мере обеспечивают подачу топлива для качественного образования воздушно-капельной смеси в камере сгорания, в силу ряда недостатков, среди которых можно назвать относительно невысокое давление впрыска топлива. Кроме того, во время нагнетания топлива в трубопроводах возникают пульсирующие волновые давления, которые могут привести к преждевременному отказу [3, 4]. Наиболее распространенная причина потери работоспособности плунжерных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД) автотракторных дизелей – снижение максимального развиваемого давления и цикловой подачи из-за износа деталей [4]. Самый характерный показатель отказа рядного топливного насоса – увеличение неравномерности распределения топлива и снижение цикловой подачи топлива, на долю которого приходится 29,2 % отказов [5]. Кроме того, традиционные системы питания дизелей с механическим регулированием характеризуются значительным выбросом вред-

ных веществ в отработавших газах и повышенным расходом топлива [2].

Повышение давления впрыска топлива увеличивает скорость истечения топлива из сопла распылителя форсунки и уменьшает средний диаметр капель, что, в свою очередь, повышает однородность распыления, а значит, и эффективность сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндре двигателя. В результате мощность дизеля возрастает, а расход топлива уменьшается, что очень важно для конечного потребителя.

В то же время с повышением давления впрыска топлива возникает необходимость в более точном изготовлении прецизионных элементов. Следовательно, возрастает технологическая и техническая потребность в оценке точности их измерения как при изготовлении, так и при обслуживании и ремонте системы питания Common Rail дизеля. Если эксплуатирующие и сервисные предприятия не успеют создать условия для обслуживания и ремонта таких высокоточных элементов, это может сопровождаться дополнительными простоями техники и непредвиденными расходами.

Цель исследований – прогнозирование возможных значений давления впрыска топлива системы Common Rail на ближайшую перспективу для своевременного создания условий эксплуатации, проведения обслуживающих и ремонтных мероприятий.

Условия, материалы и методы исследований. Работу выполняли в соответствии с планом НИОКР ФГБОУ ВО «Чувашская

ГСХА» в 2019 г. Объект исследования – изменение давления впрыска топлива системы Common Rail.

Система Common Rail обеспечивает точно дозированную по объему, продолжительности и углу подачу топлива в зависимости от режима работы двигателя. Она обеспечивает мягкий и устойчивый режим работы, улучшение динамических характеристик (мощность, крутящий момент), снижение расхода топлива, уменьшение содержания вредных примесей в выхлопных газах [6, 7]. К основным недостаткам системы можно отнести относительно высокую стоимость, жесткие требования к качеству топлива и сервисному обслуживанию.

Для определения возможных значения давления впрыска топлива системой Common Rail в ближайшей перспективе, целесообразно использование методов прогнозирования, характеризующих изменение параметров рассматриваемого объекта в различные моменты времени.

В зависимости от исходной информации различают следующие методы прогнозирования [8]:

- экспертных оценок;
- моделирования, включающие физические, физико-математические, информационные модели и др.;
- статистические, основанные на интерполяции и экстраполяции данных предварительных исследований, корреляционный и регрессионный анализ.

Выбор конкретного метода прогнозирования зависит от объема и качества исходной информации, характера изменения прогнозируемого параметра, целей прогнозирования и др. Наибольшее распространение получили статистические методы прогнозирования, позволяющие оценить возможные изменения характеристик системы в будущем на основании информации о их поведении в прошлом.

Процедура прогнозирования включает следующие этапы:

- анализ исходной информации и построение графика, иллюстрирующего изменение рассматриваемого параметра в прошлом;
- выбор математической модели (аналитической зависимости) изменения рассматриваемого параметра в прошлом;
- экстраполяция зависимости на прогнозируемый период;
- оценка прогнозируемого значения (среднее, доверительный интервал при заданной доверительной вероятности).

Выбор аналитической зависимости может быть выполнен различными методами (выбранных точек, средних, наименьших квадратов и др.). В работе его проводили методом наименьших квадратов.

Чаще всего в качестве аналитической зависимости для одной переменной x используют нелинейные функции (полиномы) вида:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n,$$

где $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ – постоянные коэффициенты.

На практике обычно достаточно использование квадратичной функции вида:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (1)$$

Коэффициенты квадратичного уравнения определяются решением системы уравнений:

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 = \sum y_i; \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 = \sum x_i \cdot y_i; \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 = \sum x_i \cdot y_i^2. \end{cases} \quad (2)$$

Корректность выбранной аналитической зависимости может быть подтверждена коэффициентом корреляции, вычисленным по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где \bar{x} и \bar{y} – средние значения рассматриваемых величин.

Принято считать, что если коэффициента корреляции $r_{xy} < 0,3$, то связь очень слабая, $r_{xy} = 0,3 \dots 0,5$ – слабая, $r_{xy} = 0,5 \dots 0,7$ – средняя, $r_{xy} = 0,7 \dots 0,9$ – сильная, $r_{xy} > 0,9$ – очень сильная [9].

В дополнение определяются границы возможного изменения прогнозируемого показателя, то есть доверительный интервал (I_β). Его величина при доверительной вероятности β равна:

$$I_\beta = \pm t_\beta \cdot S_{ki}, \quad (4)$$

где t_β – коэффициент Стьюдента;

S_{ki} – среднеквадратическая ошибка прогноза.

Среднеквадратическую ошибку прогноза для квадратичной функции рассчитывают по выражению:

$$S_{ki} = S_r \sqrt{1 + \frac{k_i^2}{\sum x_i^2} + \frac{\sum x_i^4 - (2 \sum x_i^2) \cdot k_i^2 + n \cdot k_i^4}{n \sum x_i^4 - (\sum x_i^2)^2}}, \quad (5)$$

где S_r – среднеквадратическое отклонение статистических данных y_i от расчетных значений y_{ip} в этих точках;

k_i – порядковый номер года прогноза; n – количество точек исходной информации.

Среднеквадратическое отклонение статистических данных определяют по формуле:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum (y_{ip} - y_i)^2}{n - 3}}. \quad (6)$$

Производитель поэтапно совершенствует систему питания Common Rail путем повышения давления впрыска топлива для улучшения технико-экономических характеристик дизеля. Поэтому в качестве основных факторов прогноза были взяты давление впрыска топлива и календарные годы. Исследуемый интерполяционный период ограничен сроком наблюдений, поскольку для системы Common Rail он составляет всего 20 лет, прогнозный период

Таблица 1 – Исходные данные для прогнозной оценки

| Год | | Давление впрыска топлива, МПа |
|-------------|----------------------|-------------------------------|
| календарный | условное обозначение | |
| 1999 | 1 | 140 |
| 2001 | 3 | 160 |
| 2005 | 7 | 180 |
| 2009 | 11 | 220 |
| 2015 | 17 | 250 |

Таблица 2 – Результаты расчета прогнозируемого давления впрыска топлива, МПа

| Значение | Календарный (условный) год | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-----------|
| | 2020 (22) | 2023 (25) | 2026 (28) |
| Среднее | 277 | 291 | 303 |
| Максимальное | 284 | 299 | 313 |
| Минимальное | 271 | 283 | 293 |

равен 6-и годам.

Прогнозную оценку возможных значений давления впрыска топлива системы Common Rail осуществляли в табличном процессоре EXCEL [10]. Исходные данные (табл. 1) были получены экспериментальным путем на основе измерений с использованием цифрового прецизионного манометра ДМ5002М в ФГУП «Учебно-опытное хозяйство «Приволжское» ЧГСХА, СХПК им. Ильича и СПК «Восток» Моргаушского района Чувашской Республики.

Доверительные интервалы прогнозируемого значения давления впрыска определяли при вероятности 90 %.

Анализ и обсуждение результатов исследования. Полученная на основании системы уравнений (2) зависимость имеет следующий вид:

$$y = -0,0815 \cdot x^2 + 8,3796 \cdot x + 132,28 \quad (R^2 = 0,9887).$$

Ее корректность подтверждает коэффициент корреляции (3), величина которого равна 0,99, что свидетельствует об очень сильной степени связи между экспериментальной и выбранной теоретической кривой. Результаты анализа расчетов, проведенных с использованием указанной зависимости, свидетельствуют, что при сохранении существующих на сегодняшний день темпов увеличения давления впрыска топлива к 2026 г. оно может достичь 300 МПа и более (табл. 2).

Выводы. Таким образом, можно ожидать, что при сохранении существующей тенденции повышения давления впрыска топлива системы Common Rail будет возрастать и к 2026 г. может превысить 300 МПа. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании и реконструкции предприятий по техническому сервису дизельной топливной аппаратуры для своевременного и качественного выполнения технического обслуживания и ремонта.

Литература

1. Лебедев В. Г., Иванов В. А. Анализ оценочных показателей технического состояния плунжерных пар ТНВД дизеля // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития технического сервиса в агропромышленном комплексе»: сборник научных трудов. Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2014. С. 89–90.
2. Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие / Под общ. ред. проф. О.И. Полиеваева. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 288 с.
3. Повышение точности регулирования производительности насосных секций топливного насоса распределительного типа / Ю. Н. Доброхотов, Ю. В. Иваншиков, А. Р. Валиев и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2019. Т. 14. № 1 (52). С. 77–82.
4. Минимизация утечек топлива в изношенных плунжерных парах смещением зон износа / В. Н. Гаврилов, А. М. Новиков, А. В. Семенов и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2019. № 4 (56). С. 73–77.
5. Казаков Ю. Ф., Иванов В. А. Аналитическая оценка технического состояния плунжерных пар при комплектации их по гидроплотности // Вестник Казанского ГАУ. 2018. № 1 (48). С. 138–142.
6. Голубков Л. Н., Савастенко А. А., Эмиль М. В. Топливные насосы высокого давления распределительного типа BoschVe, Лукас, Зексель, Ротодизель, НД. М.: Легион-Автодата, 2016. 184 с.
7. Мирошниченко М. Е. HyundaiCounty / CountyLong (C1/C2/C3/C4) с 1998 г. (включая обновление 2004 г. e-County). Дизельные двигатели 4.0 л. Руководство по ремонту и эксплуатации. М.: Монолит, 2017. - 196 с.
8. Основы надежности машин: учебное пособие. В 2-х ч. / И. Н. Кравченко, В. А. Зорин, Е. А. Пучин и др. – М.: РГАУ, 2007. Ч. II. 260 с.
9. Садовникова Н. А., Шмойлова Р. А. Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: МФПУ Синергия, 2016. 152 с.
10. Лебедев В. Г. Основы теории надежности: лабораторный практикум / В. Г. Лебедев, Н. Н. Тончева Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2014. 122 с.

Сведения об авторах:

Иванов Владимир Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: Vladimir21VA@mail.ru
 Семенов Александр Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, e-mail: s.alexander2011@yandex.ru
 Гаврилов Владислав Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, e-mail: Gavrilov-vlad21@yandex.ru
 Новиков Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: novam1@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», г. Чебоксары, Россия
 Волхонков Михаил Станиславович – доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, e-mail: vms72@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», г. Кострома, Россия

FORECAST EVALUATION OF POSSIBLE VALUES OF FUEL INJECTION PRESSURE OF COMMON RAIL SYSTEM

Ivanov V.A., Semenov A.V., Gavrilov V.N., Novikov A.M., Volkhonov M.S.

Abstract. In engineering practice, forecasting is considered to be the most effective methods for assessing reliability indicators and determining expected technical and economic indicators, taking into account the technical level of objects at different points in time. The purpose of the research is to predict the possible values of the fuel injection pressure of the Common Rail system for the near future for the timely creation of operating conditions, maintenance and repair measures. A statistical method was used to predict changes in the fuel injection pressure in the diesel power system. The forecasting technique included the stages of analyzing the initial information, choosing the analytical dependence of the change in the considered parameter in the past, extrapolating the resulting dependence for the forecast period and evaluating the results. The choice of analytical dependences of changes in the estimated pressure value was carried out by the method of least squares. The degree of connection between the considered analytical dependence and the line constructed from the initial data was determined by the value of the correlation coefficient. As the technical, economic and environmental requirements become more stringent, the requirements for the power supply system of internal combustion engines are growing, which necessitates an increase in the functionality of the fuel equipment, primarily in terms of the value of the fuel injection pressure. The paper considers the results of a predictive assessment of possible values of injection pressure of the Common Rail fuel system. The results of the study make it possible to predict an increase in the fuel injection pressure of the Common Rail system by 2026 up to 300 MPa. To ensure high indicators of technical readiness of the enterprises of technical service of diesel fuel equipment, it is necessary to take into account possible changes in the values of the fuel injection pressure in the future.

Key words: diesel engine, injection pressure, predictive estimate.

References

1. Lebedev V.G., Ivanov V.A. *Analiz otsenochnykh pokazateley tekhnicheskogo sostoyaniya plunzhernykh par TNVD dizelya. // Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya tekhnicheskogo servisa v agropromyshlennom komplekse": sbornik nauchnykh trudov.* (Analysis of the estimated indicators of the technical condition of the plunger pairs of diesel fuel injection pump. // Proceeding of All-Russian scientific-practical conference "Prospects for the development of technical service in the agro-industrial complex": collection of scientific papers). Cheboksary: Chuvashskaya GSKhA, 2014. P. 89–90.
2. *Konstruktsiya traktorov i avtomobiley: uchebnoe posobie. / Pod obsch. red. prof. O.I. Polievaeva.* [The design of tractors and cars: a tutorial]. / Under total edition of professor O.I. Polievaeva]. SPb.: Izdatelstvo "Lan", 2013. 288 pp.
3. Improving the accuracy of regulating the performance of the pumping sections of the distribution type fuel pump. [Povyshenie tochnosti regulirovaniya proizvoditelnosti nasosnykh sektsiy toplivnogo nasosa raspreditel'nogo tipa]. / Yu.N. Dobrokhotov, Yu.V. Ivanschikov, A.R. Valiev and others. // *Vestnik Kazanskogo GAU. – The Herald of Kazan State Agrarian University.* 2019. Vol. 14. № 1 (52). P. 77-82.
4. Minimization of fuel leaks in worn-out plunger pairs by displacement of wear zones. [Minimizatsiya utechek topliva v iznoshennykh plunzhernykh parakh smescheniem zon iznosa]. / V.N. Gavrilov, A.M. Novikov, A.V. Semenov and others. // *Vestnik Kazanskogo GAU. – The Herald of Kazan State Agrarian University.* 2019. № 4 (56). P.73-77.
5. Kazakov Yu.F., Ivanov V.A. Analytical assessment of the technical condition of plunger couples when completing them in terms of hydraulic density. [Analiticheskaya otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya plunzhernykh par pri komplektatsii ikh po gidroplotnosti]. // *Vestnik Kazanskogo GAU. – The Herald of Kazan State Agrarian University.* 2018. № 1 (48). P. 138-142.
6. Golubkov L.N., Savastenko A.A., Emil M.V. *Toplivnye nasosy vysokogo davleniya raspreditel'nogo tipa BoschVe, Lukas, Zeksel, Rotodizel, ND.* [High pressure fuel pumps of distribution type: BoschVe, Lukas, Zeksel, Rotodizel, ND]. M.: Legion-Avtodata, 2016. 184 pp.
7. Miroshnichenko M.E. *HyundaiCounty / CountyLong (C1/C2/C3/C4) s 1998 g. (vkluychaya obnovenie 2004 g. e-County). Dizelnye dvigateli 4.0 l. Rukovodstvo po remontu i ekspluatatsii.* [HyundaiCounty / CountyLong (C1/C2/C3/C4) since 1998 (including the 2004 e-County update). Diesel engines of 4.0 liters. Repair and maintenance manual]. M.: Monolit, 2017. – 196 pp.
8. *Osnovy nadezhnosti mashin: uchebnoe posobie.* [Fundamentals of machine reliability: a tutorial, 2 parts]. / I.N. Kravchenko, V.A. Zorin, E.A. Puchin and others. – M.: RGAU, 2007. Ch. II. 260 pp.
9. Sadovnikova N. A., Shmoylova R. A. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye.* [Analysis of time series and forecasting]. M.: MFPU Sinergiya, 2016. 152 pp.
10. Lebedev V.G. *Osnovy teorii nadezhnosti: laboratornyy praktikum.* [Fundamentals of the theory of reliability: laboratory practice]. / V. G. Lebedev, N. N. Toncheva Cheboksary: Chuvash.gos. ped.un-t, 2014. 122 pp.

Authors:

Ivanov Vladimir Andreevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: Vladimir21VA@mail.ru
 Semenov Aleksandr Valerievich - Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor, e-mail: s.alexander2011@yandex.ru
 Gavrilov Vladislav Nikolaevich - Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor, e-mail: Gavrilov-vlad21@yandex.ru
 Novikov Aleksey Mikhaylovich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: novam1@mail.ru
 Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia
 Volkhonov Mikhail Stanislavovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, e-mail: vms72@mail.ru
 Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia