

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ДАТЧИКА ФАЗ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
АВТОМОБИЛЯ LADA KALINA**

Кандидат техн., доцент **Денисов И.В.**
(Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ),
магистр **Смирнов А.А.**

**RESEARCH OF OPERATIONAL RELIABILITY OF GAS DISTRIBUTION PHASE SENSOR
OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF THE LADA KALINA CAR**

I.V. Denisov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. VISU),
A.A. Smirnov, Master's Degree

Автомобиль, Lada Kalina, надежность, двигатель ВАЗ-21114, датчик фаз газораспределения.

Car, Lada Kalina, reliability, engine VAZ-21114, valve timing sensor.

Содержит результаты исследования работоспособности датчика фаз газораспределения двигателя ВАЗ-21114 автомобиля Lada Kalina. Дефекты рассматриваемого элемента носят массовый характер и устраняются преимущественно в гарантийный период эксплуатации. С целью прогнозирования отказов датчика и исключения случаев некорректной работы силового агрегата в эксплуатации, авторами проведен анализ выборки значений наработок до отказа и установлены основные числовые характеристики, позволяющие дать заключение о законе распределения случайной величины. Проверка результатов по критериям Пирсона и Романовского показала принадлежность полученных данных к закону Вейбулла.

The article contains the results of a study of the performance of the valve timing sensor of the VAZ-21114 engine of the Lada Kalina. Defects of the considered element are massive and are eliminated mainly during the warranty period of operation. In order to predict sensor failures and exclude cases of incorrect operation of the power unit in operation, the authors analyzed a sample of operating time to failure values and established the main numerical characteristics that allow them to conclude on the distribution law of a random variable. Checking the results according to the Pearson and Romanovsky criteria showed that the data obtained belong to Weibull's law.

Введение. Конструкция современных колесных транспортных машин постоянно совершенствуется за счет использования новых материалов и внедрения мехатронных модулей, позволяющих повысить их эксплуатационные свойства. Получение высоких мощностных и топливно-экономических показателей силовых агрегатов автотранспортных средств (АТС) является актуальной задачей для моторостроителей, решение которой сводится к разработке эффективных систем управления рабочими процессами двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Микропроцессорная система управления работой ДВС включает в себя информационные элементы, обеспечивающие преобразование физических величин в электрические сигналы, поступающие в электронный блок управления (ЭБУ), на основании которых, в соответствии с алгоритмом, вырабатываются команды исполнительным элементам [1]. Исследования отечественных и зарубежных ученых в области технической эксплуатации автомобилей свидетельствуют о том, что датчики системы управления работой двигателя имеют более высокий уровень дефектности по сравнению с исполнительными элементами и могут стать причиной некорректной работы силового агрегата, а также способствовать иррациональному использованию его ресурса.

Постановка задачи исследования. Современные электронные системы управления (ЭСУ) работой автомобильного двигателя имеют фазированный впрыск топлива и воспламенения рабочей смеси. Для информирования ЭБУ о положении распределительного вала и поршня первого цилиндра используются датчики положения коленчатого вала и фаз газораспределения.

В эксплуатации, в случае отказа первого, пуск и работа силового агрегата невозможны. В свою очередь, дефект второго элемента вызывает затрудненный пуск ДВС и его переход в аварийный режим работы, сопровождающийся переключением с фазированного впрыска на управление подачей топлива в цилиндры двигателя по показаниям датчика положения коленчатого вала, т.е. системы зажигания. При этом ЭБУ силового агрегата сигнализирует об этом контрольно-диагностической лампой «*Check engine*».

В работе [2] содержатся результаты анализа дефектов двигателей модели ВАЗ-21114, по итогам которого были установлены элементы, лимитирующие их надежность. На протяжении трех лет, в течение которых собирались данные, от собственников колесных транспортных машин (КТМ) поступило 5372 гарантийных обращения [3], из них 618 (11,5%) – в системе ДВС. Согласно таблице 1, вторым по частоте возникновения дефектов в рассматриваемых силовых агрегатах авто-

мобилей *Lada Kalina* является отказ датчика фаз газораспределения (каталожный номер 3706040). За отчетный период произошло 76 неисправностей указанного элемента, что составляет долю 12,3% от общего их количества в системе управления работой ДВС.

Таблица 1.

Дефекты системы ДВС автомобилей семейства *Lada Kalina*

№ п/п	Дефект (неисправность)	Кол-во	Средняя наработка на отказ, \bar{X} , тыс. км	Средне-квадратическое отклонение, σ
1	Не работает регулятор холостого хода	105	22,9	12,4
2	Дефект датчика фаз газораспределения	76	20,7	11,7
3	Течь в сальник распределительного вала	70	21,6	13,6
4	Попадание масла в свечные колодцы	50	26,2	10,3
5	Течь в задний сальник коленчатого вала	46	21,1	13,7

Результаты исследования и их обсуждение. Настоящая публикация является продолжением цикла работ [2,3] по исследованию эксплуатационной надежности автомобилей *Lada Kalina* и посвящена установле-

нию основных показателей надежности датчика фаз газораспределения ДВС.

Конструктивно рассматриваемый информационный компонент ЭСУ ДВС представляет собой микросборку на основе элемента Холла [4] с вторичным преобразователем сигнала, необходимым для формирования задающих импульсов, поступающих в ЭБУ в момент такта впуска горючей смеси в первый цилиндр двигателя. Вторичный преобразователь рассматриваемого элемента содержит измерительный мост, сигнал с которого преобразуется операционным усилителем, и выходной каскад.

На предварительном этапе экспериментальных исследований был установлен минимально необходимый объем выборки дефектных датчиков фаз газораспределения в соответствии с рекомендациями работы [6]. Достоверность результатов гарантировалась при условии, что в подконтрольной группе автомобилей *Lada Kalina* произойдет не менее 58 отказов рассматриваемых элементов конструкции системы управления работой ДВС.

После получения необходимых сведений в процессе проведения пассивного эксперимента установлена требуемая по объему выборка значений наработок дефектных датчиков ($N = 75$). Использование методики обработки экспериментальных данных, представленной в работе [7], позволило авторам настоящей статьи получить числовые характеристики случайной величины ресурсного пробега исследуемого элемента. Результаты расчета основных показателей работоспособности содер- жатся в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты расчета основных показателей работоспособности датчика фаз газораспределения двигателя модели ВА3-21114 автомобиля *Lada Kalina*

№ п/п	Показатель	Обозначение	Интервал наработки (ресурсного пробега)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Границы интервалов, тыс. км	$X_i \div X_k$	0÷6,2	6,2÷12,4	12,4÷18,6	18,6÷24,8	24,8÷31,0	31,0÷37,2	37,2÷43,4	43,4÷49,6
2	Середины интервалов, тыс. км	\bar{X}_i	3,1	9,3	15,5	21,7	27,9	34,1	40,3	46,5
3	Опытные частоты попадания в интервал	m_i^*	7	11	21	11	13	3	4	5
4	Относительная величина частоты	W_i	0,093	0,147	0,280	0,147	0,173	0,040	0,053	0,067
5	Теоретические вероятности попадания в интервал	P_i	0,088	0,187	0,212	0,187	0,138	0,089	0,051	0,026
6	Теоретические частоты попадания в интервал	m_i	6,7	14,0	15,9	14,0	10,4	6,7	3,8	1,9
7	Вероятности безотказной работы	$P(\bar{X}_i)$	0,911	0,724	0,511	0,325	0,186	0,097	0,046	0,020
8	Вероятности отказа	$F(\bar{X}_i)$	0,089	0,276	0,489	0,675	0,814	0,903	0,954	0,980
9	Интенсивность отказов	$\lambda(\bar{X}_i) \cdot 10^{-5}$	1,66	4,25	6,78	9,35	12,02	14,81	17,73	20,79

Математические расчеты и их анализ позволил выявить минимальное (X_{\min}) и максимальное (X_{\max}) значения наработок в выборке подконтрольной группы КТМ модели *Lada Kalina*. Как показали исследования,

отказы датчиков фаз газораспределения ДВС не позволили собственникам автомобилей их эксплуатировать уже при пробеге 1,5 тыс. км, т.е. до момента проведения ТО-1 согласно сервисной книжке [8]. Это свидетельствует о производственном характере обнаружен-

ных дефектов. Данные значения при последующей обработке экспериментальных данных не учитывались. При этом максимальное значение наработки в подконтрольной выборке составляло 46,05 тыс. км.

Величина шага интервала определена по формуле

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,32 \lg(N)}. \quad (1)$$

После подстановки числовых данных в расчетную формулу (1), установлен шаг интервала

$$h = \frac{46050 - 1500}{1 + 3,32 \lg(75)} = 6187,5 \approx 6,2 \text{ тыс.км.}$$

Среднее арифметическое ресурса анализируемого элемента вычисляют с использованием выражения

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \bar{X}_i m_i^*, \quad (2)$$

где \bar{X}_i – середина i -го интервала наработки изделий в гарантийный период эксплуатации; m_i^* – соответствующая данному интервалу частота; k – количество интервалов.

Внесение числовых значений в расчетную формулу (2) позволило определить среднее арифметическое значение наработки

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{75} (3,1 \cdot 7 + 9,3 \cdot 11 + 15,5 \cdot 21 + \dots + 46,5 \cdot 5) = \\ &= 20,58 \approx 20,6 \text{ тыс.км.} \end{aligned}$$

Затем переходим к расчету опытных относительных частот попадания отказов датчиков в интервалы наработки с использованием выражения

$$W_i = m_i^* / N. \quad (3)$$

Таким образом, значения параметров будут равны $W_1 = 7/75 = 0,093$; $W_2 = 11/75 = 0,147$; $W_3 = 21/75 = 0,280$ и т.д. (см. табл.2)

Для расчета среднеквадратического отклонения наработки до отказа использовалась следующая математическая зависимость

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^k (\bar{X}_i - \bar{X})^2 m_i^*}. \quad (4)$$

Подстановка значений наработки в данное выражение позволила определить искомый параметр

$$\begin{aligned} \sigma(X) &= \\ &= \sqrt{\frac{((3,1-20,6)^2 \cdot 7 + (9,3-20,6)^2 \cdot 11 + \dots + (46,5-20,6)^2 \cdot 5)}{75-1}} \approx \\ &\approx 11,7 \text{ тыс.км.} \end{aligned}$$

Предварительную оценку относительной меры рассеивания случайной величины наработки до отказа датчика фаз газораспределения системы управления работой двигателя модели ВАЗ-21114 автомобиля *Lada Kalina* и установление закона её распределения осуществляют с использованием коэффициента вариации, который может быть найден по формуле

$$v = \frac{\sigma(X)}{\bar{X}} = \frac{11,7}{20,6} = 0,57. \quad (5)$$

Полученное значение свидетельствует о вероятной принадлежности распределения случайной величины двухпараметрическому закону Вейбулла ($r=2$). По справочным таблицам работы [7] установлен параметр формы, величина которого равна $n \approx 1,8$.

С использованием математической зависимости, представленной ниже, рассчитан второй параметр закона распределения наработки до отказа изделия

$$\mu = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\bar{X}}. \quad (6)$$

При осуществлении расчетов были использованы справочные значения гамма-функции Эйлера [7]. Таким образом, параметр масштаба равен

$$\mu = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{1,8}\right)}{20600} = \frac{0,888}{20600} = 4,31 \cdot 10^{-5}.$$

При этом величина обратного параметра масштаба имеет значение

$$\alpha = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{4,31 \cdot 10^{-5}} = 23179,95. \quad (7)$$

Теоретические вероятности попадания в интервал рассчитаны с использованием следующей математической зависимости

$$P(X_i < X < X_{i+1}) = e^{-\left(\frac{X_i}{\alpha}\right)^n} - e^{-\left(\frac{X_{i+1}}{\alpha}\right)^n}. \quad (8)$$

Для первого интервала исследуемого вариационного ряда величина вероятности будет равна

$$P(X_1) = 2,718^{-\left(\frac{0}{23179,95}\right)^{1,8}} - 2,718^{-\left(\frac{6200}{23179,95}\right)^{1,8}} = 0,088,$$

а, для второго

$$P(X_2) = 2,718^{-\left(\frac{6200}{23179,95}\right)^{1,8}} - 2,718^{-\left(\frac{12400}{23179,95}\right)^{1,8}} = 0,187.$$

Аналогично проведены расчеты $P(X_i)$ и для других интервалов наработки, а их результаты представлены в строке 5 табл. 2.

На основании расчетных данных, содержащихся в строках 4 и 5 табл. 2, выполнено построение гистограммы (1) распределения значений наработок до отказа исследуемых элементов системы управления работой ДВС, а также сглаживающей кривой (2), которые представлены на рис. 1.

Теоретические частоты попадания дефектных датчиков фаз в интервалы наработки установлены по формуле

$$m_i = P(X_i)N. \quad (9)$$

Таким образом, $m_1 = 0,088 \cdot 75 = 6,7$; $m_2 = 0,187 \cdot 75 = 14,0$ и т.д. Строка 6 табл. 2 содержит результаты искомых параметров в оставшихся интервалах вариационного ряда.

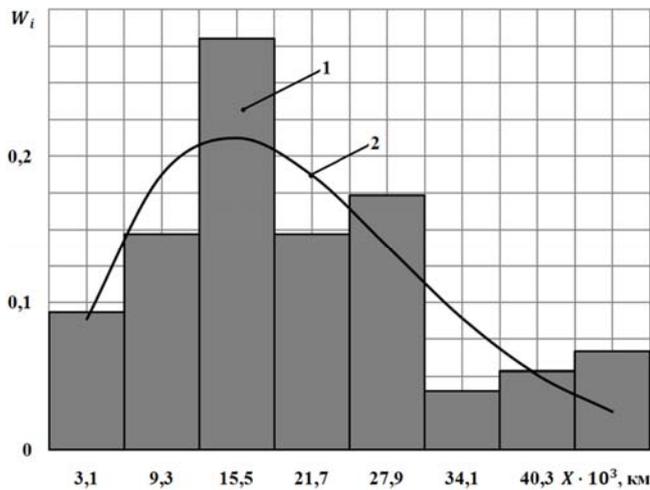


Рис. 1. Графическое отображение распределения значений наработок до отказа датчика фаз газораспределения ЭСУ ДВС ВАЗ-21114 автомобиля *Lada Kalina* (1), попавшие в интервалы вариационного ряда, и его сглаживающая кривая (2)

Характер гистограммы подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о том, что распределение наработки, на которой возникали дефекты датчика фаз газораспределения двигателя модели ВАЗ-21114 автомобиля *Lada Kalina*, принадлежат закону Вейбулла. Данное утверждение потребовалось проверить с помощью критериев Пирсона и Романовского.

Расчет слагаемых критерия Пирсона выполнен с использованием выражения

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i^* - m_i)^2}{m_i} \quad (10)$$

$$\frac{(m_1^* - m_1)^2}{m_1} = \frac{(7 - 6,7)^2}{6,7} = 0,018;$$

$$\frac{(m_2^* - m_2)^2}{m_2} = \frac{(11 - 14,0)^2}{14,0} = 0,666$$

и т.д.

После суммирования всех слагаемых значение критерия Пирсона приняло следующую величину $\chi^2 = 10,41$. Табличное значение данного параметра при числе степеней свободы $S = k - r - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ составило $\chi_{табл}^2 = 11,07$.

Критерий Романовского рассчитан по формуле

$$K_p = \frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = \frac{10,41 - 8}{\sqrt{2 \cdot 8}} = 0,603 < 3,0. \quad (10)$$

Поскольку условие $\chi^2 < \chi_{табл}^2$ выполняется, а Критерий Романовского меньше трех, то гипотеза о принадлежности данных, полученных в ходе пассивного эксперимента, к закону распределения Вейбулла не отвергается.

На основании расчетных данных значений теоретических вероятностей попадания дефектных датчиков фаз газораспределения в интервалы наработки установлены вероятности отказа и безотказной работы (строки 7, 8 табл. 2). Графическое представление распределения указанных параметров по наработке изображено на рис. 2.

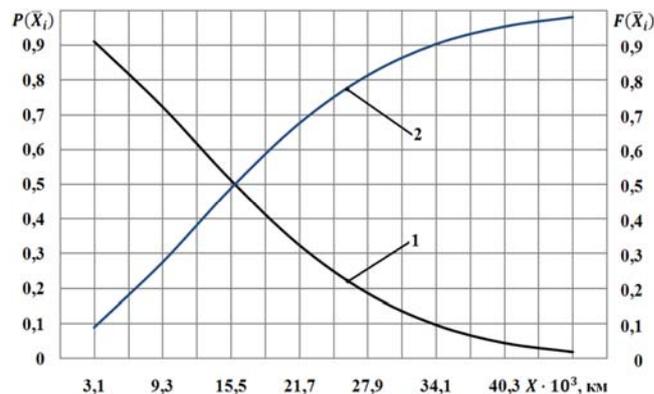


Рис. 2. Графическое представление распределения вероятности отказа (2) и безотказной работы (1) датчика фаз газораспределения автомобиля *Lada Kalina*

По данным строки 9 таблицы 1 построена номограмма зависимости интенсивности отказов (рис. 3) датчика фаз газораспределения от наработки.

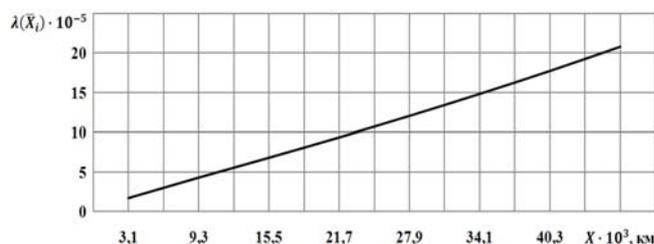


Рис. 3. График распределения интенсивности отказов датчика фаз газораспределения автомобиля *Lada Kalina* по наработке

Заключение. Результаты исследования эксплуатационной надежности автомобильного двигателя модели ВАЗ-21114 позволили выявить наиболее массовые дефекты его конструктивных элементов, среди которых одними из лимитирующих надежность являются датчики фаз газораспределения, имеющие средний ресурс $X_{cp} = 20,7$ тыс. км. По итогам анализа числовых характеристик представительной выборки наработок до отказа установлена их принадлежность к закону Вейбулла. Проверка гипотезы по критериям согласия Пирсона и Романовского подтверждает ее состоятельность.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования момента отказа датчика фаз газораспределения ДВС автомобиля *Lada Kalina* и исключения случаев некорректной работы силового агрегата в эксплуатации. Мастеру-диагносту при выполнении контрольно-диагностических воздействий, реализуемых при плановом техническом обслуживании транспортных машин, рекомендуется проводить углубленное диагностирование рассматриваемого в настоящей публикации информационного элемента системы управления работой двигателя.

Литература

1. Борщенко Я.А., Васильев В.И. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учеб. пособие / Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2007. – 207 с.
2. Денисов И.В., Смирнов А.А. Надежность двигателя ВАЗ-21114 автомобилей *Lada Kalina* // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2020. – № 4. – С. 12-17.

3. Денисов И.В., Смирнов А.А. Исследование надежности автомобиля *Lada Kalina* в гарантийный период эксплуатации // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 10. – С. 33-35.

4. ЭСУД автомобилей семейства LADA KALINA, LADA 110 и LADA NIVA с контроллером М7.9.7 ЕВРО-3 – устройство и диагностика / П.Л. Козлов, А.В. Куликов, А.Е. Рекунов, П.Н. Христов, В.С. Боюр, В.А. Зимин. Тольятти: ОАО НВП «ИТЦ АВТО», 2006. – 228 с.

5. Денисов И.В., Смирнов А.А. Надежность автомобилей в гарантийный период их эксплуатации // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 11. – С. 1-4.

6. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 160 с. – ISBN 5-89368-655-1.

7. Моделирование производственных процессов автомобильного транспорта // сост. С.И. Коновалов, С.А. Максимов, В.В. Савин. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 244 с.

Сведения об авторах:

Денисов Илья Владимирович, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), кафедра Автомобильный транспорт.

Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Белоконой, д. 3, корпус 2, ауд. 315-2.

Тел.: 8(915)-776-24-14.

E-mail: denisoviv@mail.ru.

Смирнов Алексей Александрович, продавец-консультант, GRAND-мебель.

Адрес: 601914, Владимирская обл., г. Ковров, ул. Комсомольская, д. 24.

Тел.: 8(920)622-15-21.

E-mail: AlexiFoX@yandex.ru.