

УДК 629.113.004:658.562.4:621.4

В.П. ИВАНОВ, д-р техн. наук; А.В. ДУДАН, Т.В. ВИГЕРИНА, кандидаты техн. наук
Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОБОСНОВАНИЕМ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Предложен и апробирован метод прогнозирования остаточного ресурса автомобильных двигателей с использованием интерполяционного полинома Лагранжа, отличающийся меньшей трудоемкостью и удовлетворительной точностью прогноза. На примере обследования 40 двигателей определена зависимость послеремонтной наработки двигателей от начального значения основного параметра (зазора между гильзой и поршнем). Метод определения остаточной долговечности агрегатов характеризуется меньшим объемом вычислений с погрешностью расчетов 5–7%. Установлено, что наибольшее влияние на послеремонтную наработку двигателей оказывает качество восстановления их трущихся цилиндрических соединений. Основным средством повышения послеремонтной долговечности двигателей в два раза является использование специального расточного оборудования, изготавливаемого станкостроительными заводами, вместо применяемого универсального оборудования или изготовленного силами самих ремонтных заводов.

Ключевые слова: двигатель, долговечность, основной параметр, остаточный ресурс, прогнозирование, оборудование

Введение. Сведения об остаточном ресурсе автомобильных агрегатов необходимы для планирования сроков и объемов их ремонта с определением потребности в запасных частях. Существуют различные методы определения остаточного ресурса агрегатов [1–6]. Самый простой, хотя и приближенный метод основан на линейном программировании, когда изменение основного параметра в зависимости от наработки является линейным. При этом остаточный ресурс агрегата $L_{ост}$ определяют по формуле [7–8]

$$L_{ост} = L_T \left(\frac{P_{пр} - P_{нач}}{P_T - P_{нач}} - 1 \right),$$

где L_T — текущая наработка агрегата с начала эксплуатации или после ремонта; $P_{нач}$ и $P_{пр}$ — начальное и предельное значение основного параметра, соответственно; P_T — текущее значение основного параметра в момент определения технического состояния.

С начальным значением основного параметра $P_{нач}$ (в литературе называемого структурным параметром) агрегат вводят в эксплуатацию после изготовления или капитального ремонта. Изменение параметра во время обкатки агрегата ввиду его малости не учитывают. Предельное значение параметра $P_{пр}$ соответствует техническому состоянию агрегата, при котором он или не может выполнять заданную функцию из-за изнашивания или выполнение этой функции связано с большим расходом ресурсов. В большинстве случаев $P_{нач} < P_T < P_{пр}$.

Часто изменение основного параметра в зависимости от наработки описывают степенным уравнением

$$P_T = P_{нач} + kL_T^\alpha,$$

где k — опытный коэффициент; α — показатель степени, характеризующий скорость изменения основного параметра.

При линейном изменении параметра $\alpha = 1$, скорость изменения параметра P_T за время службы агрегата является постоянной. При $\alpha > 1$ значение параметра P_T непрерывно растет, а кривая его изменений вогнутая. Фактически значение α для различных агрегатов колеблется в пределах 1,1–2,0 и выше. При прогнозировании оста-

точного ресурса автомобильных двигателей α принимает следующие значения [7]:

- по прорыву газов в картер 1,3–1,5;
- по угару картерного масла 1,8–2,0;
- по мощности двигателя 1,1–1,7;
- по зазору в подшипниках коленчатого вала 1,4–1,6.

В последнем случае остаточный ресурс агрегата определяют по формуле [9]

$$L_{ост} = L_T \left[\left(\frac{P_{пр} - P_{нач}}{P_T - P_{нач}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right].$$

Если распределение остаточного ресурса агрегата подчинено закону Вейбулла, то его остаточный ресурс с заданной вероятностью безотказной работы рассчитывают по формуле [9]

$$L_{ост} = L_T \left[\left(\frac{P_{пр}/P_T + B\sigma_n}{1 + B\sigma_n} \right)^{1/\alpha} - 1 \right],$$

где B — табулированный интеграл вероятностей (квантиль); σ_n — среднее квадратическое отклонение погрешности прогнозирования.

Рассмотренные методы определения остаточного ресурса агрегатов трудоемки и не обеспечивают необходимой точности его прогноза.

Цель работы заключалась в повышении точности прогноза остаточного ресурса автомобильных двигателей и выработке решений по повышению их долговечности.

Методы исследования. В работе использованы положения теории надежности и математической статистики, а также сведения о послеремонтной наработке отремонтированных двигателей.

Для изучения послеремонтной наработки было выбрано 40 восьмицилиндровых двухрядных бензиновых двигателей с рабочим объемом 4,25 л (таблица 1). Техническое состояние двигателей монотонно изменяется под влиянием изнашивания трущихся соединений. Однако можно выделить такое соединение, предельное состояние которого в наибольшей степени определяет

Таблица 1 — Нарботка L (тыс. км пробега) отремонтированных двигателей до предельного состояния в зависимости от начального значения зазора Π (мм) между поршнем и цилиндром

№	Π	L	№	Π	L	№	Π	L	№	Π	L
1	0,05	153	11	0,09	95	21	0,10	91	31	0,11	74
2	0,06	120	12	0,09	112	22	0,10	87	32	0,11	69
3	0,07	91	13	0,09	103	23	0,10	90	33	0,11	78
4	0,07	144	14	0,09	104	24	0,10	121	34	0,11	54
5	0,07	128	15	0,09	105	25	0,10	89	35	0,11	77
6	0,08	119	16	0,09	105	26	0,10	88	36	0,12	56
7	0,08	130	17	0,09	123	27	0,11	70	37	0,12	60
8	0,08	116	18	0,09	105	28	0,11	74	38	0,12	59
9	0,08	109	19	0,09	98	29	0,11	76	39	0,12	55
10	0,08	123	20	0,10	87	30	0,11	70	40	0,13	40

предельное состояние всего двигателя [10, 11]. Агрегат в этом случае требует капитального ремонта или списания. В качестве указанного параметра был принят зазор между гильзой и поршнем, который характеризует техническое состояние двигателя, он в наибольшей степени отвечает за мощность и расход топлива и образует тесную корреляционную связь с другими параметрами.

Содержание промышленного эксперимента следующее. Размеры деталей, образующих трущиеся соединения, измеряли с помощью нутромеров и рычажно-зубчатых головок на рабочих местах их восстановления, после чего рассчитывали значение параметра как замыкающего размера. Большой интерес представляли случаи, когда значения параметра существенно превышали нормативные, например, при выпуске продукции по особым санкциям.

Детали поступали на рабочие места сборки и устанавливались на двигатели. На каждый из собираемых двигателей составляли формуляр, в котором указывали детали со значениями их размеров. Работники лаборатории надежности наладили отношения с хозяйствами, в которых эксплуатировались двигатели, а по каждому из них были получены сведения о его наработке до предельного состояния.

Основная часть. Предложен метод определения остаточного ресурса автомобильных агрегатов (на примере наиболее сложных из них — автомобильных двигателей) с использованием экспериментальных сведений о наработке агрегатов при изменении основного параметра Π от начального случайного его значения до неслучайного предельного.

Влияние параметра Π на их долговечность двигателей L определяют построением полиномиальной кривой в виде интерполяционного полинома Лагранжа $L = L(\Pi)$ [12]. Для его поиска вначале рассчитывают многочлены $l_i(\Pi)$

$$l_i(\Pi) = \frac{(\Pi - \Pi_0) \cdot (\Pi - \Pi_1) \cdot \dots \cdot (\Pi - \Pi_{i-1}) \cdot (\Pi - \Pi_{i+1}) \cdot \dots \cdot (\Pi - \Pi_m)}{(\Pi_i - \Pi_0) \cdot \dots \cdot (\Pi_i - \Pi_{i-1}) \cdot \dots \cdot (\Pi_i - \Pi_{i+1}) \cdot \dots \cdot (\Pi_i - \Pi_m)}, \quad (1)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, m$ — узлы интерполяции.

Каждый из многочленов (1) проходит через одну из выделенных точек, принимая значение 1, в остальных точках принимают значение 0.

Затем определяют базисные многочлены путем умножения каждого многочлена (1) на значение функции $L_i(\Pi)$ в соответствующем узле интерполяции. И, нако-

нец, суммированием базисных многочленов находят целый многочлен $L(\Pi)$, который в узлах интерполяции принимает те же значения, что и сама функция. При этом, для любого i справедлива интерполяционная формула Лагранжа

$$L(\Pi) = \sum_{i=0}^{i=m} L_i(\Pi) l_i(\Pi). \quad (2)$$

Степень многочлена при этом не выше m .

Пример. Для массива сведений (см. таблицу 1) выбрано четыре узла интерполяции (0, 1, 2, 3) со значениями основного параметра 0,06; 0,08; 0,10 и 0,12 мм. Указанные значения равны средним арифметическим величинам в окрестностях указанных узлов. Определяемый полином будет четвертой степени.

Уравнения многочленов $l_i(\Pi)$ следующие:

$$l_0(\Pi) = -20\,833\Pi^3 + 62\,500\Pi^2 - 616,7\Pi + 20; \quad (3)$$

$$l_1(\Pi) = 62\,500\Pi^3 - 17\,500\Pi^2 + 1\,575\Pi - 45; \quad (4)$$

$$l_2(\Pi) = -62\,500\Pi^3 + 16\,250\Pi^2 - 1\,350\Pi + 36; \quad (5)$$

$$l_3(\Pi) = 20\,833\Pi^3 - 5\,000\Pi^2 + 391,7\Pi - 10. \quad (6)$$

Значения многочленов в узлах интерполяции равны 1, в остальных узловых точках они равны 0. Условие служит проверкой правильности составления и вычисления этих многочленов.

Умножаем многочлены l_i на значения $L_i(\Pi)$ в узлах интерполяции, для этого каждое из уравнений (3)–(6) умножаем на значения 0,1450; 0,1207; 0,0901 и 0,0562 (млн км пробега), соответственно, и получаем базисные многочлены (рисунок):

$$L_0(\Pi) = -3020,83\Pi^3 + 906,25\Pi^2 - 89,42\Pi + 2,9; \quad (7)$$

$$L_1(\Pi) = 7543,75\Pi^3 - 2112,25\Pi^2 + 190,10\Pi - 5,43; \quad (8)$$

$$L_2(\Pi) = -5631,25\Pi^3 + 1464,12\Pi^2 - 121,63\Pi + 3,24; \quad (9)$$

$$L_3(\Pi) = 1170,83\Pi^3 - 281\Pi^2 + 22,01\Pi - 0,56. \quad (10)$$

Для изображения графиков базисных многочленов (7)–(10) определяли значения многочленов при различных значениях основного параметра (таблица 2).

Сложением уравнений (7)–(10) находим интерполяционный полином Лагранжа (см. рисунок)

$$L(\Pi) = 62,5\Pi^3 - 22,88\Pi^2 + 1,06\Pi + 0,15, \text{ млн км пробега.}$$

Остаточный ресурс агрегата равен разнице прогнозируемой амортизационной наработке агрегата, соответствующей начальному значению основного параметра, и достигнутой наработке на данный момент времени.

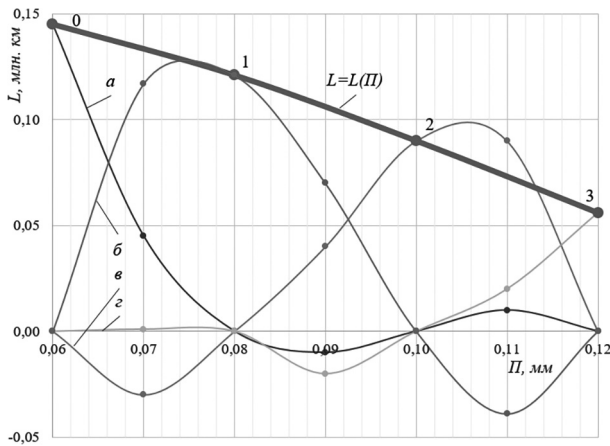


Рисунок — Зависимость послеремонтной наработки L двигателей от начального значения параметра Π (зазора между гильзой и поршнем) в виде интерполяционного полинома Лагранжа $L(\Pi)$. Базисные многочлены: $a — L_0(\Pi)$; $b — L_1(\Pi)$; $в — L_2(\Pi)$; $z — L_3(\Pi)$; узлы интерполяции: 0, 1, 2, 3

По сравнению с другими предлагаемый метод определения остаточной долговечности агрегатов характеризуется меньшим объемом вычислений с погрешностью расчетов 5–7 %.

При увеличении начального значения основного параметра (зазора между поршнем и гильзой) в два раза (с 0,06 до 0,12 мм) послеремонтная наработка двигателей уменьшается в среднем в 2,59 раза.

Далее рассмотрим меры для повышения долговечности двигателей, учитывая, что их трущиеся цилиндрические соединения являются определяющими.

Большой объем растачивания отверстий при ремонте агрегатов обусловлен соответствующим количеством внутренних цилиндрических поверхностей: доля таких поверхностей в двигателе внутреннего сгорания составляет около 30 % [10]. Обработка резанием должна обеспечить не только нормативную точность диаметров отверстий, но и их форму (цилиндричность) и параметры расположения (соосности и параллельности осей отверстий). Параметры расположения и формы в большинстве случаев не контролируются по причине большой трудоемкости контроля или отсутствия необходимых средств.

В условиях ремонтных предприятий гильзы цилиндров растачивают на универсальных расточных станках 2Н78, которые не удовлетворяют современным требованиям. В то же время специальный четырехшпиндельный станок ОС-2777 одновременно обрабатывает четыре изделия со скоростью резания, превышающей в два раза скорость резания на станке 2Н78. Благодаря большой жесткости станка и резцам, изготовленным из сверхтвердых материалов, параметры деталей соответствует

нормативам, в том числе по цилиндричности отверстия, составляющей долю не допуска на размер (0,060 мм), а долю допуска размерной группы (0,012 мм). Если считать, что допуск формы составляет половину допуска на размер, то обеспечивается допуск цилиндричности 0,006 мм. С объемами до 25 тыс. ремонтов в год справляется один станок ОС-2777, в то время, как для обеспечения такого объема выпуска продукции необходимо иметь до 10 станков 2Н78. Хотя стоимость специального станка в 12 раз превышает стоимость универсального станка, зато заработная плата на обработку комплекта изделий в 9,5 раз меньше, что вместе с меньшими эксплуатационными затратами и налогами обеспечивает экономическую целесообразность применения специального станка, начиная с объемов ремонта 6,3 тыс. двигателей в год. Годовая экономия средств от его использования при росте объемов ремонта агрегатов с 6,3 до 25 тыс. в год изменяется от 50,2 до 287,5 тыс. руб. При изменении вида обрабатываемых ремонтных заготовок станок может быть легко перепрофилирован под другие изделия путем замены установочного приспособления.

Растачивание отверстий в коренных опорах блока цилиндров (диаметром 70–80 мм) требует обеспечения таких параметров: допуск на диаметр отверстий 0,015–0,017 мм, суммарный допуск круглости и профиля продольного сечения 0,007 мм, межосевое расстояние отверстий коренных опор и под распределительный вал 0,015 мм, а допуск параллельности их осей — 0,15 мм на длине 1200 мм.

Специальные расточные станки изготавливают заводы Министерства сельского хозяйства и продовольствия (ОР-14556, ОР-14560, ОР-14572, ОР-14573 и другие) — для одновременного растачивания коренных опор блоков цилиндров и втулок распределительного вала различных двигателей. Станки типа ОР, обладая малой массой и жесткостью, не способны обеспечить нормативную точность обработки отверстий.

Станкозаводы производят станки (11А848, 13А458 и др.) для одновременного растачивания длинных прерывистых отверстий — коренных опор совместно с отверстиями во втулках распределительного вала и отверстия под стартер в блоке цилиндров. Для растачивания отверстия во втулке, запрессованной в отверстие поршневой головки шатуна, выпускают станки КК-1454. Только такие станки обеспечивают нормативные параметры обработки.

Заключение. Предложен и обоснован метод определения наработки агрегатов до предельного состояния при наличии мониторинговых сведений, что позволяет рассчитать их остаточный ресурс в виде разницы наработки до предельного состояния и текущей наработки в рассматриваемый момент времени с использованием интерполяционного полинома Лагранжа. Метод определения остаточной долговечности агрегатов

Таблица 2 — Значения базисных многочленов L_i в узлах графика

Наименования многочленов	Значения побега L (млн км пробега) в зависимости от начального значения основного параметра Π (мм)						
	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
$L_0(\Pi)$	0,145	0,045	0	-0,010	0	0,010	0
$L_1(\Pi)$	0	0,117	0,121	0,070	0	-0,039	0
$L_2(\Pi)$	0	-0,030	0	0,040	0,090	0,090	0
$L_3(\Pi)$	0	0,001	0	-0,020	0	0,020	0,056

характеризуется меньшим объемом вычислений с погрешностью расчетов 5–7 %. Наибольшее влияние на послеремонтную наработку двигателей оказывает качество восстановления их трущихся цилиндрических соединений. Кардинальным средством повышения долговечности двигателей до двух раз является использование специального расточного оборудования, изготавливаемого на станкостроительных заводах, вместо применяемого универсального оборудования или изготавливаемого силами ремонтных заводов.

Список литературы

1. Forecasting remaining resource of assemblies and units of trucks in the environment of spreadsheet / A.G. Fedorov [et al.] // Siberian herald of agricultural science. — 2016. — No. 3. — Pp. 89–95.
2. Баженов, Ю.В. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации / Ю.В. Баженов, М.Ю. Баженов // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 4. — С. 16–21.
3. Баженов, Ю.В. Прогнозирование остаточного ресурса электронных систем управления двигателем / Ю.В. Баженов, В.П. Каленов // Вестник СибАДИ. — 2017. — № 2(54). — С. 52–59.
4. Десницкий, А.А. Проблемы прогнозирования остаточного ресурса безопасной эксплуатации пожарных автомобилей в системе МЧС России / А.А. Десницкий, Н.М. Лоран // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2016. — № 1-1(7). — С. 110–114.
5. Research on service life prediction of diesel engine / Da-shuai Wei [et al.] // Journal of Software Engineering. — 2016. — No. 10. — Pp. 392–399. — DOI: <http://doi.org/10.3923/jse.2016.392.399>.
6. Кокорев, Г.Д. Методика выбора диагностируемых параметров автомобилей в условиях сельскохозяйственного производства / Г.Д. Кокорев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. — 2016. — № 117. — С. 793–806.
7. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин. — М.: Транспорт, 1984. — 141 с.
8. Ждановский, Н.С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н.С. Ждановский, А.В. Николаенко. — 2-е изд. — Л.: Колос, 1981. — 295 с.
9. Михлин, В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В.М. Михлин. — М.: Колос, 1984. — 335 с.
10. Иванов, В.П. Влияние качества ремонта двигателей на их долговечность / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. — 2012. — № 3(50). — С. 30–34.
11. Иванов, В.П. Комплексное диагностирование цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // В.П. Иванов, А.Н. Василькович, Г.А. Уваров // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2015. — № 11. — С. 87–92.
12. Авхадиев, Ф.Г. Учебно-методическое пособие по численным методам анализа / Ф.Г. Авхадиев, Р.К. Губайдуллина, Р.Г. Насибуллин. — Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. — 113 с.

Ivanov V.P., Dudan A.V., Vigerina T.V.

Assessment of the residual life of vehicles engines with justification of measures to increase their durability

A method for predicting the residual life of automobile engines using the Lagrange interpolation polynomial is proposed and tested. The method is less labor intensive and has a satisfactory prediction accuracy. On the example of a survey of 40 engines, the dependence of the post-overhaul operating time of engines on the initial value of the diagnostic parameter (the gap between the sleeve and the piston) is defined. The method for determining the residual life of units is characterized by a smaller amount of calculations with an error of 5–7 %. It has been established that the greatest influence on the post-repair operating time of engines is exerted by the quality of restoration of their rubbing cylindrical joints. The main means of increasing the post-overhaul durability of by up to two times is the use of special boring equipment manufactured at machine-tool plants, instead of the universal equipment used or manufactured by the repair plants themselves.

Поступила в редакцию 26.05.2022.