

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН

Бухтеев О.М.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: диагностика дизельного двигателя, математическое прогнозирование остаточного ресурса, погрузочно-доставочные машины, методология технического обслуживания, байесовский подход, диагностические маркеры технического состояния.

Аннотация. Рассмотрены наиболее актуальные проблемы объективной оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса дизельных двигателей, применяемых в погрузочно-доставочных машинах на подземных работах. Рассмотрены актуальные и наиболее распространённые методики прогнозирования остаточного ресурса дизельных двигателей, применяемые на горных производствах. Предложена математическая модель, для прогнозирования остаточного ресурса, основанная на анализе динамики скорости изменения ключевых диагностических параметров на основе данных, полученных бортовой системой диагностики и в результате штатных диагностических процедур в рамках базового технического обслуживания. Проанализированы основные диагностические параметры, позволяющие наиболее точно спрогнозировать остаточный ресурс двигателя, и выявлены основные факторы, влияющие на точность прогнозирования остаточного ресурса. Показаны потенциальные проблемы применения данной математической модели в условиях производства.

ESTIMATION OF THE RESIDUAL LIFE OF ENGINES IN LOADING AND DELIVERY VEHICLES

Bukhteev O.M.

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow

Keywords: diesel engine diagnostics, mathematical prediction of residual life, material handling machines, maintenance methodology, Bayesian approach, diagnostic markers of technical condition.

Abstract. The most urgent problems of objective assessment of technical condition and prediction of residual life of diesel engines used in loading and delivery machines in underground works are considered. Actual and most common methods of forecasting the residual life of diesel engines used in mining operations are considered. A mathematical model for forecasting the residual life is proposed, based on the analysis of the dynamics of the rate of change of key diagnostic parameters on the basis of data obtained by the on-board diagnostic system and as a result of standard diagnostic procedures within the framework of basic maintenance. The main diagnostic parameters allowing to predict the residual engine life most accurately are analyzed and the main factors influencing the accuracy of residual life prediction are revealed. Potential problems of application of this mathematical model in production conditions are shown.

Введение

Надежная работа дизельных двигателей тяжелых горных машин во многом определяет эффективность горнодобывающего производства. Своевременная оценка остаточного ресурса этих агрегатов позволяет оптимизировать график обслуживания и предотвратить внезапные отказы. Особенно актуальна эта проблема для двигателей погрузочно-доставочных машин (ПДМ), эксплуатируемых в тяжёлых условиях подземных выработок.

Преобладающая часть отказов дизельных двигателей происходит из-за несвоевременного выявления критического износа деталей. Внедрение эффективных методов оценки остаточного ресурса способно существенно снизить количество аварийных остановок и повысить готовность оборудования.

Изучение современных методов оценки остаточного ресурса двигателей показывает, что наиболее перспективным направлением является использование математических моделей, учитывающих динамику изменения основных диагностических параметров [1]. При этом

крайне важно правильно определить набор контролируемых параметров и установить их связь с техническим состоянием двигателя.

Традиционный подход к оценке ресурса часто ограничивается учетом наработки двигателя, расхода топлива и масла [2]. Однако эти показатели не всегда дают полную картину технического состояния. Современные системы бортовой диагностики позволяют регистрировать более широкий спектр параметров, что создает новые возможности для точного прогнозирования ресурса.

Внедрение байесовского метода в математическое моделирование процессов износа обеспечивает учет как детерминированных параметров (наработки, эксплуатационных нагрузок), так и стохастических факторов, включая вероятностный характер деградации материалов, погрешности измерений и вариативность условий эксплуатации [3].

Методы исследования

В качестве основного объекта изучения будет рассматриваться двигатель Caterpillar C9.3B с учётом его эксплуатационной документации и рекомендаций производителя этот двигатель, базовые характеристики этого двигателя приведены ниже.

- конфигурация двигателя: рядный, 6-цилиндровый;
- максимальная мощность: 340 кВт;
- максимальный крутящий момент 2088 Н·м при 1400 об/мин;
- номинальная частота вращения: 1800-2200 об/мин;
- рабочий объем: 9,3 л;
- выбросы загрязняющих веществ: стандарт Stage V ЕС.

На основе анализа его эксплуатационной литературы были выделены следующие ключевые диагностические параметры: эффективная мощность двигателя (N_e), удельный расход топлива (g_e), давление масла в главной масляной магистрали (p_m), расход картерных газов (G_k), дымность отработавших газов (K) и вибрация двигателя (V) [4].

Выбор именно этих параметров обусловлен их высокой информативностью и возможностью измерения современными бортовыми системами без необходимости разборки двигателя [5]. Каждый из этих показателей несет важную информацию о состоянии различных узлов и систем двигателя [6].

Для надёжной эксплуатации горно-транспортного оборудования необходима эксплуатационная стратегия, формирование которой невозможно без оценки остаточного ресурса, именно повышение общего ресурса рабочего транспорта, и снижение времени простоя, являются ключевыми задачами основных методик технического обслуживания [7].

Для оценки остаточного ресурса применяется множество различных методик, сейчас активно разрабатываются методики с применением ИИ, и технологий машинного обучения [8], так же перспективной считается технология цифровых двойников [9]. На производствах же для расчёта остаточного ресурса чаще применяется, математическое моделирование [10]. Его недостатком считается то что, математическое моделирование не учитывает многие практические аспекты, и не адаптируется под конкретные условия эксплуатации, для совершенствования этого метода может использоваться бортовая система диагностики собирающая актуальные данные, в процессе работы машины [11]. Это позволит точнее анализировать техническое состояние двигателя в процессе эксплуатации, и производить более объективную оценку как технического состояния двигателя, так и общий остаточный ресурс двигателях [12].

Математическая модель оценки остаточного ресурса

При разработке математической модели для оценки остаточного ресурса дизельных двигателей необходимо учитывать физические процессы износа узлов и механизмов, а также их взаимосвязь с измеряемыми диагностическими параметрами. Предлагаемая модель основана на комплексном подходе, объединяющем физические закономерности износа с методами статистического анализа.

Так, снижение эффективной мощности указывает на потерю компрессии и износ поршневых колец. Рост удельного расхода топлива свидетельствует об ухудшении процесса сгорания и износе форсунок. Снижение давления масла указывает на износ подшипников коленчатого вала и масляного насоса. Увеличение расхода картерных газов связано с износом поршневых колец и гильз цилиндров. Рост дымности отработавших газов говорит о нарушении процесса сгорания и износе форсунок. Повышение уровня вибрации двигателя указывает на общее ухудшение его технического состояния, дисбаланс, износ подшипников и ослабление креплений.

Для каждого i -го диагностического параметра определяются три ключевых значения:

$S_{0,i}$ – начальное (номинальное) значение i -го параметра для нового двигателя;

$S_{t,i}$ – текущее измеренное значение i -го параметра;

$S_{np,i}$ – предельное значение i -го параметра, при котором требуется капитальный ремонт.

Для унификации шкал различных параметров вводится безразмерный показатель степени деградации параметра:

$$D_i = \frac{S_{t,i} - S_{0,i}}{S_{np,i} - S_{0,i}}, \quad (1)$$

где $0 \leq D_i \leq 1$, при этом $D_i = 0$ соответствует новому двигателю, а $D_i = 1$ соответствует предельному состоянию, требующему капитального ремонта.

Скорость деградации параметров не является постоянной и зависит от многих факторов, включая наработку двигателя, условия эксплуатации и текущее состояние. Исследования показывают, что процесс деградации большинства параметров дизельных двигателей описывается экспоненциальной или степенной функцией. Для моделирования динамики изменения i -го параметра предлагается использовать следующее выражение:

$$v_i(t) = \alpha_i \cdot D_i^{\beta_i} \cdot e^{\gamma_i \cdot t}, \quad (2)$$

где $v_i(t)$ – скорость изменения i -го параметра; α_i – базовая скорость деградации параметра; β_i – показатель нелинейности процесса деградации; γ_i – коэффициент ускорения деградации; t – наработка двигателя, моточас.

Коэффициенты α_i , β_i и γ_i определяются экспериментально для конкретного типа двигателя на основе анализа статистических данных о динамике изменения параметров в течение срока службы.

На основе степени деградации отдельных параметров рассчитывается интегральный показатель технического состояния двигателя:

$$TS = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot D_i)^2}, \quad (3)$$

где $0 \leq TS \leq 1$; w_i – весовой коэффициент i -го параметра; D_i – степень деградации i -го параметра; n – количество диагностических параметров.

Весовые коэффициенты w_i определяются методом экспертных оценок или на основе анализа чувствительности остаточного ресурса к изменению каждого параметра.

Весовые коэффициенты отражают значимость различных параметров в оценке общего технического состояния. На основе анализа статистических данных и экспертной оценки можно рекомендовать следующие значения весовых коэффициентов: для эффективной мощности – 0,25; для удельного расхода топлива – 0,15; для давления масла – 0,20; для расхода картерных газов – 0,20; для дымности отработавших газов – 0,10; для вибрации двигателя – 0,10.

Остаточный ресурс двигателя (моточас) рассчитывается с учетом интегрального показателя технического состояния и прогнозируемой скорости его изменения:

$$R = \frac{TS - TS_{np}}{\frac{d(TS)}{dt}} \cdot k_{эсп}, \quad (4)$$

где TS_{np} – предельное значение показателя технического состояния; $d(TS)/dt$ – скорость изменения интегрального показателя; $k_{эсп}$ – корректирующий коэффициент условий эксплуатации.

Скорость изменения интегрального показателя технического состояния определяется как:

$$\frac{d(TS)}{dt} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot D_i)^2}} \cdot \sum_{i=1}^n (w_i \cdot D_i \cdot w_i \cdot v_i(t)). \quad (5)$$

Корректирующий коэффициент условий эксплуатации учитывает влияние внешних факторов на скорость деградации технического состояния двигателя:

$$k_{\{эсп\}} = k_T \cdot k_H \cdot k_D \cdot k_L, \quad (6)$$

где k_T – коэффициент, учитывающий температурный режим работы (0,8-1,2); k_H – коэффициент, учитывающий влажность и запыленность (0,7-1,1); k_D – коэффициент, учитывающий динамичность нагрузки (0,8-1,2); k_L – коэффициент, учитывающий качество технического обслуживания (0,9-1,1).

Применения таких коэффициентов и их значения в заданных пределах для расчётов схожего типажа часто рекомендуют производители в документах по адаптации технического обслуживания к условиям работы. Для некоторых двигателей и случаев уже есть рекомендованные значения, однако, как правило, точные значения определяются экспериментально.

Для повышения точности прогнозирования остаточного ресурса предлагается использовать байесовский подход к уточнению параметров модели по мере накопления данных о работе двигателя. Пусть $\theta = \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, w_i\}$ – вектор параметров модели. Тогда:

$$p(\theta|D) \propto p(D|\theta) \cdot p(\theta), \quad (7)$$

где $p(\theta|D)$ – апостериорное распределение параметров модели после наблюдения данных D ; $p(D|\theta)$ – функция правдоподобия, показывающая вероятность наблюдения данных D при параметрах θ ; $p(\theta)$ – априорное распределение параметров, основанное на предварительных знаниях о двигателе.

Практическая реализация предложенной модели требует создания базы данных с начальными, текущими и предельными значениями диагностических параметров для различных типов двигателей. Кроме того, необходима система непрерывного мониторинга, которая будет фиксировать текущие значения параметров и рассчитывать интегральный показатель технического состояния.

Важным аспектом применения модели является определение предельных значений диагностических параметров. Эти значения могут быть получены из технической документации производителя двигателя или установлены экспериментально на основе анализа данных о работе двигателей до наступления отказа.

Следует отметить, что точность прогноза существенно повышается по мере накопления статистических данных о работе конкретного двигателя. Использование метода байесовского обновления параметров модели позволяет дополнительно повысить точность прогнозирования остаточного ресурса, особенно при значительной наработке двигателя.

Разработанная математическая модель представляет собой комплексный инструмент для оценки остаточного ресурса дизельных двигателей тяжелых машин. Она учитывает как текущие значения диагностических параметров, так и динамику их изменения, что позволяет получить более точный прогноз по сравнению с традиционными методами. Использование интегрального показателя технического состояния дает возможность комплексно оценить степень износа различных систем и узлов двигателя и определить его остаточный ресурс с учетом конкретных условий эксплуатации.

Ниже приведены графики расчётов остатка моточасов наработки двигателя Caterpillar C9.3B, основываясь на его различных параметрах, полученных в результате диагностики: дымности (рис. 1), вибрации (рис. 2), неравномерности вращения (рис. 3).

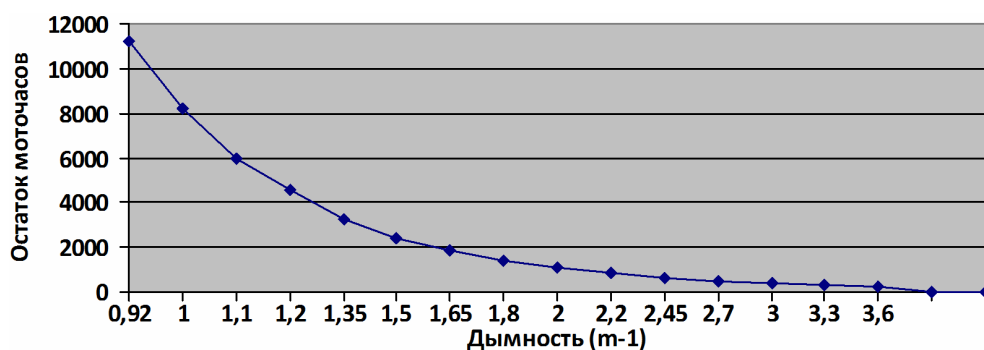


Рис. 1. Зависимость остаточного ресурса от показателя дымности

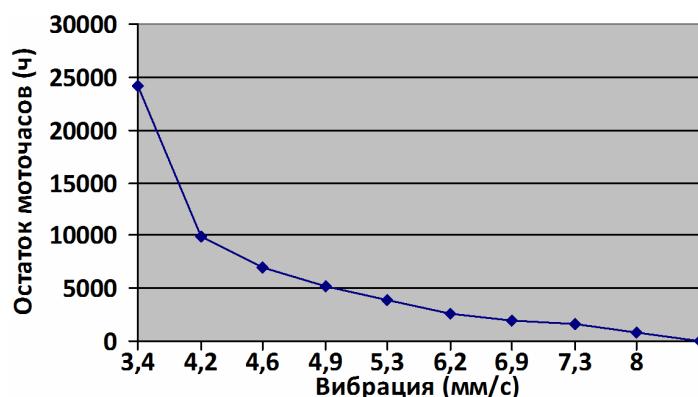


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса от показателя вибрации

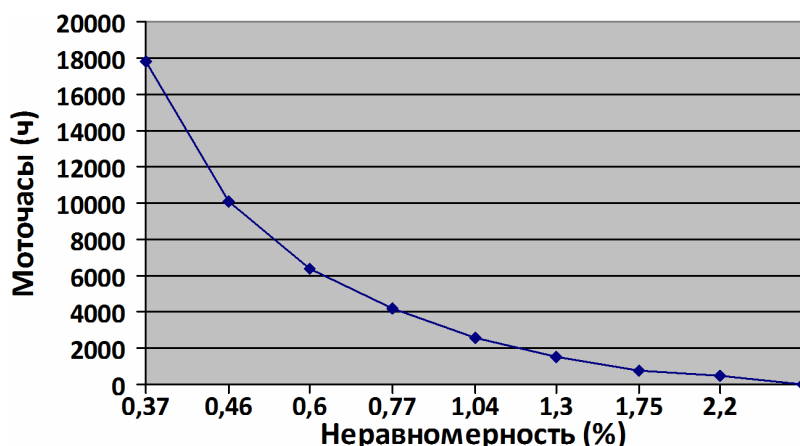


Рис. 3. Зависимость остаточного ресурса от показателя неравномерности вращения

На графиках мы видим, что стартовые прогнозы слегка завышены ввиду ещё неустановившейся тенденции по деградации параметра, позже он начинает давать более реалистичные оценки, к моменту достижения значений которые являются критическими, прогноз остатка моточасов является мизерным, что сигнализирует о критическом состоянии двигателя.

Применение методики

Внедрение разработанной методики оценки остаточного ресурса требует решения ряда организационных и технических задач. Это включает оснащение парка ПДМ современными системами бортовой диагностики, создание базы данных для накопления информации, разработку специализированного программного обеспечения и его интеграцию с существующими системами управления техническим обслуживанием.

При внедрении системы необходимо учитывать специфику конкретного предприятия, особенности эксплуатации техники и действующие регламенты технического обслуживания. Такой подход позволит максимально эффективно использовать возможности разработанной методики для повышения надежности работы оборудования.

Особое внимание следует уделить калибровке математической модели для конкретных типов двигателей и условий эксплуатации. Это может потребовать проведения дополнительных исследований и сбора статистических данных в течение продолжительного периода времени.

Предложенный подход к оценке остаточного ресурса может быть адаптирован для различных типов двигателей внутреннего сгорания, а также для других видов машин и механизмов, что определяет широкую область его потенциального применения.

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты.

1. Разработана комплексная математическая модель оценки остаточного ресурса дизельных двигателей, основанная на безразмерных показателях деградации параметров и учитывающая нелинейный характер их изменения во времени. Ключевым отличием предложенной модели является использование интегрального показателя технического состояния двигателя, рассчитываемого с учетом весовых коэффициентов диагностических параметров.

2. Обоснована система диагностических параметров, включающая эффективную мощность двигателя, удельный расход топлива, давление масла, расход картерных газов, дымность отработавших газов и вибрацию. Установлена их связь с физическими механизмами износа конкретных узлов и систем двигателя.

3. Предложен метод определения остаточного ресурса, использующий не только статические значения параметров, но и динамику их изменения, что позволяет повысить точность прогнозирования по сравнению с традиционными подходами.

4. Разработан механизм адаптации модели к конкретным условиям эксплуатации через систему корректирующих коэффициентов, учитывающих температурный режим, запыленность, динамичность нагрузки и качество технического обслуживания.

5. Для повышения точности прогнозирования предложено использование байесовского подхода к уточнению параметров модели, что обеспечивает адаптацию системы прогнозирования по мере накопления статистических данных о работе конкретного двигателя.

Список литературы

1. Загайко С.А. Математическое моделирование изнашивания деталей ЦПГ ДВС // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17, №3(56). – С. 231-238.
2. Носов В.В., Лагута И.В. Диагностика машин и оборудования. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 376 с.
3. Kozan E., Köksoy O. A Bayesian Parameter Estimation Approach to Response Surface Optimization in Quality Engineering // Sakarya University Journal of Science. 2019, vol. 23, no. 5, pp. 767-774.
4. Puchalski A. A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015, no. 56-57, pp. 173-180.
5. Атаманов Ю.Е., Плищ В.Н., Поварехо А.С., Равино В.В., Таяновский Г.А. Моделирование характеристик дизельного двигателя: учебно-методическое пособие. – Минск: БНТУ, 2014. – 196 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: учебник / Под ред. Б.А. Шароглазова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 382 с.
7. Хорешок А.А., Кудреватых А.В., Кузнецов В.В. Характеристика методов технического обслуживания горно-транспортного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №55. – С. 48-61.
8. Zhang L., Lin J., Liu B., Zhang Z., Yan X., Wei M. A Review on Deep Learning Applications in Prognostics and Health Management // IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 162415-162438.
9. Лапина М.А., Багаутдинова А.Р., Лапин В.Г., Лапин В.В. Цифровые двойники: обзор решений и перспективы развития // Auditorium. – 2024. – №3(43). – С. 88-93.
10. Загайко С.А. Моделирование механических потерь двигателей внутреннего сгорания в системе имитационного моделирования «Альбея». – Уфа: УГАТУ, 1996. – 74 с.
11. Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019, vol. 126, pp. 662-685.
12. Кузнецов А.В. Методы оценки технического состояния дизельных двигателей горной техники // Горные машины и автоматика. – 2020. – №3. – С. 45.
13. Андреева Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №5. – С. 136-143.

References

1. Zagayko S.A. Mathematical modeling of the wear of parts of the internal combustion engine CSP // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. 2013, vol. 17, no. 3(56), pp. 231-238.
2. Nosov V.V., Laguta I.V. Diagnostics of machines and equipment. – SPb.: Lan, 2021. – 376 c.
3. Kozan E., Köksoy O. A Bayesian Parameter Estimation Approach to Response Surface Optimization in Quality Engineering // Sakarya University Journal of Science. 2019, vol. 23, no. 5, pp. 767-774.
4. Puchalski A. A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015, no. 56-57, pp. 173-180.
5. Atamanov Yu.E., Plisch V.N., Povarekho A.S., Ravino V.V., Tayanovsky G.A. Modeling of the diesel engine characteristics: textbook. – Minsk: BNTU, 2014. – 196 p.
6. Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes: textbook / Edited by B.A. Sharoglazov. – Chelyabinsk: Publ. house of SUSU, 2006. – 382 p.
7. Khoreshok A.A., Kudrevatykh A.V., Kuznetsov V.V. Characteristics of the methods of maintenance of mining and transportation equipment // Mining information and analytical bulletin. 2011, no. S5, pp. 48-61.
8. Zhang L., Lin J., Liu B., Zhang Z., Yan X., Wei M. A Review on Deep Learning Applications in Prognostics and Health Management // IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 162415-162438.
9. Lapina M.A., Bagautdinova A.R., Lapin V.G., Lapin V.V. Digital twins: review of solutions and prospects of development // Auditorium. 2024, no. 3(43), pp. 88-93.
10. Zagayko S.A. Modeling of the mechanical losses of the internal combustion engines in the system of imitation modeling “Albeya”. – Ufa: USATU, 1996. – 74 p.
11. Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019, vol. 126, pp. 662-685.
12. Andreeva L.I. Machinery availability evaluation in mining // Mining information and analytical bulletin. 2018, no. 5, pp. 136-143.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бухтеев Олег Максимович – аспирант	Bukhteev Oleg Maksimovich – postgraduate student
olemak@mail.ru	

Получена 02.06.2025