

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

И.А. Серебряков¹, А.П. Мириленко²

¹ *Белорусский национальный технический университет*

² *Белорусский государственный аграрный технический университет*

Аннотация. Логические алгоритмы поиска неисправности, положенные в основу диагностических карт силовых установок автомобилей, не всегда обладают оптимальной структурой с точки зрения достижения наименьших стоимостных и временных показателей процесса диагностирования. Был разработан метод оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей, позволяющий минимизировать стоимостные характеристики диагностических карт. В настоящей работе проведен сравнительный анализ преобразованных разработанным методом и существующих диагностических алгоритмов. Для решения этой задачи была разработана специальная методика виртуального эксперимента. По результатам анализа установлено, что применение разработанного метода статистически значимо обеспечило среднее снижение затрат на диагностирование на 7,4 %.

Ключевые слова: диагностирование двигателей, диагностическая карта, логический алгоритм диагностирования с выбором последующего действия, граф алгоритма диагностирования, критерий оценки эффективности диагностирования, сравнительный анализ алгоритмов диагностирования, метод Монте-Карло.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF OPTIMIZED ALGORITHMS FOR CAR ENGINES DIAGNOSING

I. Serebryakov¹, A. Mirylenka²

¹ *Belarusian National Technical University*

² *Belarusian State Agrarian Technical University*

Abstract. Logical algorithms for troubleshooting are the basis for diagnostic maps of car power plants. They are not always have an optimal structure in terms of achieving the lowest cost and time indicators of the diagnostic process. There were developed a method for optimizing algorithms for diagnosing car engines. It allows to minimize cost characteristics of diagnostic maps. In the present work, a comparative analysis of the developed diagnostic algorithms and the existing diagnostic algorithms has been carried out. To solve this problem, a special technology of virtual experiment was developed. According to the results of the analysis, it was found that the application of the developed method statistically significantly. It provided an average reduction in the cost of diagnosing by 7,4 %.

Keywords: engine diagnostics, diagnostic map, logical diagnostic algorithm with a choice of subsequent action, graph, criterion for evaluating the effectiveness of diagnostics, comparative analysis of diagnostic algorithms, method Monte-Carlo.

Введение

Сложные технические устройства повсеместно используются в различных сферах жизни человека. Современные автомобили, без которых сложно представить жизнь человека, оснащены двигателями, которые относятся к сложным техническим устройствам. В 2021 году 91 % [1] проданных автомобилей был оснащен двигателями внутреннего сгорания. В автопарке стран СНГ их доля составляет более 99%. Тем не менее, учитывая экспоненциальный рост продаж электромобилей, следует сказать, что предложенная методика может применяться и для автомобилей, оснащенных электродвигателями.

На протяжении всего срока службы автомобиль подвергается техническому обслуживанию и ремонту. Неотъемлемой составляющей ремонта автомобиля являются операции диагностирования. В данном исследовании рассматривается диагностирование двигателей внутреннего сгорания. Для выявления точной причины отказа двигателя целесообразно придерживаться определенной последовательности действий – алгоритма диагностирования [2].

Анализ существующей практики диагностирования бензиновых двигателей легковых автомобилей на примере марки Lada показал [3], что при разработке документов, регламентирующих порядок

технического обслуживания (диагностических карт) не учитываются стоимостные характеристики алгоритмов диагностирования, в результате чего экономика диагностирования не является достаточно эффективной.

Был разработан метод оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей, позволяющий минимизировать стоимостные характеристики диагностических карт [4]. Для формирования полноценного заключения о перспективах применения и результативности разработанного метода следует провести сравнительный анализ его эффективности.

Преобразование алгоритма с целью его оптимизации

Структурное преобразование алгоритма осуществляется с целью минимизации его себестоимости (рисунок 1). Оно заключается в изменении порядка осуществления проверочных действий с учётом вероятностей их реализации и стоимостных характеристик. При этом алгоритм сохраняет внутреннюю достоверность и полноту, поскольку исходная совокупность диагностируемых им исходов остаётся прежней.

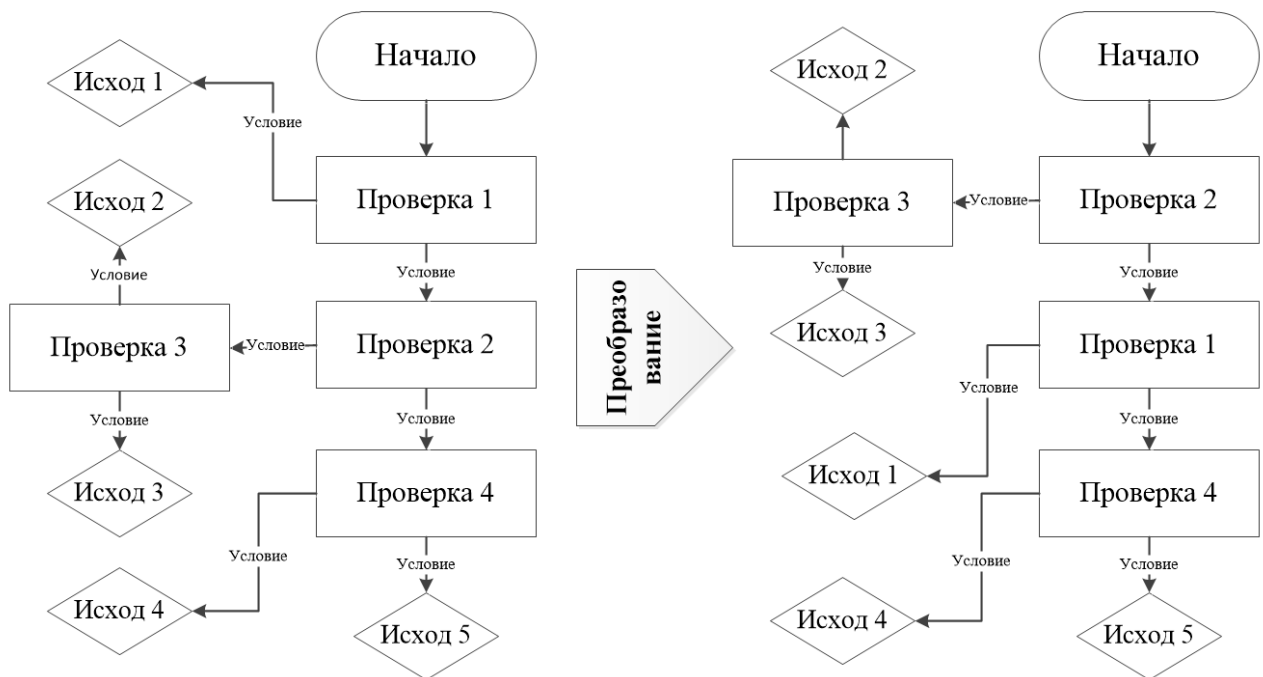


Рисунок 1 – Структурное преобразование алгоритма диагностирования

Критерий оценки эффективности алгоритмов

Критерий эффективности алгоритма диагностирования будет пониматься как средняя себестоимость выполнения работ по поиску неисправностей, входящих в данную диагностическую карту. Таким образом он будет связан одновременно и со стоимостными характеристиками операций, и с вероятностями неисправностей. Критерий будет определяться средней стоимостью диагностирования (далее – ССД), а значит, математическим ожиданием стоимости диагностирования, которое является средним (взвешенным по вероятностям возможных значений) значением случайной величины [4, 5]. Таким образом, при наличии полного перечня неисправностей и вероятности каждой из них, понимаемой как эмпирическая доля случаев отдельной неисправности, математическое ожидание будет вычисляться по формуле:

$$ССД = \sum_{i=1}^n P_i \cdot S_i, \text{ у.е.}$$

где P_i – вероятность i -го исхода;

S_i – полная себестоимость диагностирования i -го исхода, рассчитываемая как сумма себестоимостей всех предшествующих ему операций, у.е.;

n – количество возможных исходов;

i – номер конкретного исхода.

Разработанный метод оптимизации алгоритма приводит к минимизации данной величины.

Существующие подходы к сравнению эффективности диагностических алгоритмов

Анализ эффективности разработанного метода будет основываться на сравнении ССД равнозначных алгоритмов диагностирования (т.е. алгоритмов диагностирования, выявляющих одни и те же исходы) по исходной совокупности диагностических карт и по оптимизированной с помощью разработанного метода совокупности.

Принципиально, можно говорить о нескольких подходах к методологии сравнения.

1. Прямой математический способ. Данный способ предполагает арифметический расчет математического ожидания стоимости диагностирования по конкретному алгоритму в сугубом соответствии с имеющимися вероятностями. Этот подход недостаточно учитывает вариабельность реальных данных и в конечном счёте принципиально не позволяет оценить статистическую значимость различий. В связи с этим, такой способ проверки будет являться недостаточно объективным.

2. Натурный эксперимент. Данный метод сравнения предполагает внедрение разработанного метода в практику организации автосервиса. Его практическая реализация должна выглядеть следующим образом: для оценки эффективности необходимо произвести измерения затрат времени и денег на диагностирование одних и тех же отказов, но по разным алгоритмам (стандартному и оптимизированному). Этот способ сопряжен с рядом трудностей. Во-первых, он потребует очень существенных временных затрат, ведь необходимо будет наработать статистически значимый массив данных по каждому событию (диагностическому исходу), учитывая ширину возможного диапазона отказов. Во-вторых, значительное влияние будет иметь человеческий фактор. Один и тот же слесарь-диагност на диагностирование одной и той же неисправности может затратить различное время, т.к. в конкретный момент времени его эмоциональное, физическое и психическое состояние будут оказывать существенное влияние на процесс диагностики.

В связи с вышеперечисленным, натурный эксперимент представляется крайне затруднительным и малореальным в исполнении.

3. Виртуальный эксперимент. В этом случае осуществляется эмуляция реальных процессов с помощью математических методов. Поскольку в нашем случае распределение отказов силовых установок имеет стохастический характер, его моделирование может основываться на т.н. методе Монте-Карло [6], предполагающем многократную генерацию виртуальных случаев наблюдения и дальнейшую оценку генеральной совокупности по полученному массиву данных. Подробнее реализация метода в данном исследовании будет описана далее. Данный способ будет являться объективным, в то же время он будет сопряжен с невысокими затратами на реализацию и отсутствием влияния человеческого фактора.

Анализ рассмотренных подходов показывает, что наиболее осуществимым и в то же время достаточно объективным в нашем случае будет являться виртуальный эксперимент. Далее будет рассмотрена его практическая реализация.

Описание принятого подхода сравнительной оценки разработанного метода

Для удобства восприятия пошаговая схема принятого подхода сравнительной оценки алгоритмов изображена на рисунке 2. Рассмотрим каждый шаг подробнее.

На первом шаге была получена статистика отказов, на основе которых строилась таблица вероятностей исходов. Для этого были проанализированы отказы электронной системы управления двигателем автомобилей Lada Vesta, Lada X-Ray, Lada Largus, оснащенных одинаковыми двигателями ВАЗ 21129 и одинаковой электронной системой управления соответственно. С этой целью было обработано 267 заказ-нарядов на диагностирование вышеупомянутых автомобилей. Кроме того, полученные данные были подвергнуты критическому анализу со специалистами дилерского центра Volkswagen, и сопоставлены с отказами модели Volkswagen Polo, имеющей схожий двигатель. По результатам анализа экспертным методом была подтверждена их адекватность.

В исследование были включены следующие разделы неисправностей: неисправности системы зажигания, электрической цепи и механической части системы топливоподачи; общее диагностирование запуска двигателя; неисправности главного реле и силовой цепи. После анализа информации неисправности были занесены в базу данных вероятностей (шаг 2 на рисунке 2), фрагмент которой продемонстрирован в таблице 1. Таблица 1 включает в себя неисправности электрической цепи системы топливоподачи. На следующем шаге осуществлялся подбор диагностических карт, позволяющих своей полнотой покрыть неисправности из полученной базы данных. Для примера рассмотрим соответствующую неисправностям электрической цепи системы топливоподачи диагностическую карту «А-5. Проверка электрической цепи системы подачи топлива» [7].

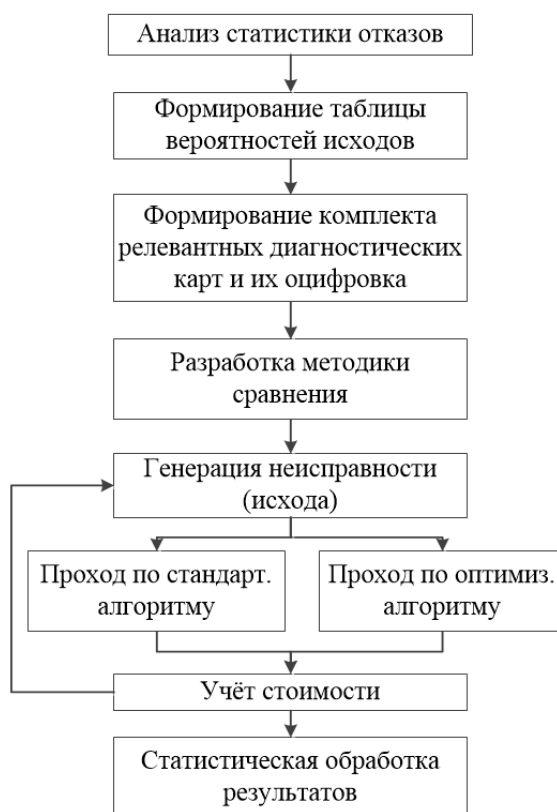


Рисунок 2 – Предлагаемый порядок действий для сравнительного анализа эффективности алгоритмов диагностирования

Возможные отказы, диагностируемые этой картой, были занесены в таблицу 1, и каждому из них было присвоено удельное значение вероятности. Для удобства анализа, суммарная вероятность неисправностей в таблице приведена к 100 %, однако следует понимать, что в общем списке рассматриваемых неисправностей её вероятность будет умножаться на вероятность наличия неисправности по соответствующей карте. Таблица содержит в себе следующую информацию: наименование диагностического исхода, которое в диагностической карте формулируется в виде действия, которое необходимо совершить для устранения той или иной неисправности, и соответствующий этой конкретной неисправности уникальный идентификатор. Также таблица включает столбец с количеством наблюдаемых случаев каждой неисправности, вероятностные диапазоны неисправностей, полученные последовательным сложением вероятностей каждого из исходов.

На основе полученного статистического распределения, согласно разработанному методу [4] оптимизируются алгоритмы диагностирования.

На следующем шаге необходимо осуществить генерацию виртуальной выборки неисправностей методом Монте-Карло. Принципиально генерация осуществляется следующим образом: генерируется случайное число в диапазоне от 0 до 1 и записывается в соответствующий столбец таблицы 2. То, в какой диапазон вероятностей попадает случайное число, и будет являться номером диагностического случая. Идентификаторы диагностических случаев соответствуют идентификаторам из таблицы 1.

Таким образом можно получить рандомизированную выборку диагностических случаев в соответствии с изначально заданным вероятностным распределением. Теперь выборку случайных случаев необходимо подвергнуть виртуальному диагностированию стандартным и оптимизированным алгоритмами диагностирования. При выявлении каждой неисправности диагност проходит определенный путь по алгоритму диагностирования. В виртуальном эксперименте каждый путь имеет условную стоимость, выраженную в условных единицах (у.е.). Стоит также отметить, что условные стоимости пропорциональны реальным стоимостям, которые, как правило, рассчитываются исходя из непосредственных затрат времени на диагностирование. Для наибольшей реалистичности, каждый случай записывается или в контрольную группу, соответствующую стандартному алгоритму поиска неисправности, или в исследуемую, соответствующую оптимизированному алгоритму. Запишем результаты в таблицу 2.

Таблица 1 – Фрагмент базы данных со статистическим распределением неисправностей

| Наименование диагностического исхода | ID неисправ. | Кол-во наблюд. | Вероятность неисправ., % | Диапазон вероят., % |
|---|--------------|----------------|--------------------------|---------------------|
| Устранить неисправность эл. цепи питания электробензонасоса | 504 | 8 | 8,89 | 0–8,89 |
| Устранить неисправность эл. цепи массы электробензонасоса | 506 | 5 | 5,56 | 8,89–14,44 |
| Заменить электробензонасос | 507 | 18 | 20,00 | 14,44–34,44 |
| Заменить предохранитель электробензонасоса | 510 | 14 | 15,56 | 34,44–50,00 |
| Устранить неисправность эл. цепи питания реле электробензонасоса | 511 | 10 | 11,11 | 50,00–61,11 |
| Устранить неисправность эл. цепи управления от реле электробензонасоса до главного реле | 514 | 5 | 5,56 | 61,11–66,67 |
| Неисправен ЭБУ. Заменить | 515 | 9 | 10,00 | 66,67–76,67 |
| Заменить реле электробензонасоса | 517 | 21 | 23,33 | 76,67–100 |
| Всего: | | 90 | 100% | |

Таблица 2 – Фрагмент таблицы результатов виртуального эксперимента

| Номер эксперимента | Случайное число | ID неисправ. | Контрольная группа | Исследуемая группа | Усл. стоимость диагностир. у.е. |
|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1 | 0,1111 | 506 | + | | 16 |
| 2 | 0,7122 | 515 | + | | 20 |
| 3 | 0,5648 | 511 | | + | 13 |
| 4 | 0,4617 | 510 | + | | 13 |
| 5 | 0,8306 | 517 | | + | 11 |
| 6 | 0,8656 | 517 | + | | 16 |
| 7 | 0,1162 | 506 | + | | 16 |
| 8 | 0,2863 | 507 | + | | 16 |
| 9 | 0,3922 | 510 | | + | 13 |
| 10 | 0,045 | 504 | | + | 16 |

Таким образом были получены 2 массива стоимостей: для контрольной и исследуемой групп. Средняя величина стоимости для каждой группы, полученная таким образом, и будет являться экспериментально полученной ССД соответствующей группы. Таблица 2 отражает небольшой фрагмент виртуального эксперимента, для проведения которого было сгенерировано 1000 виртуальных случаев обращения на СТО, которые в соответствии с рандомизацией распределились следующим образом: 508 случаев попали в исследуемую группу, 492 в контрольную группу. По результатам исследования установлено, что средняя себестоимость проведения диагностирования в исследуемой группе составила 14,54 у.е., в контрольной группе 15,71 у.е., различия статистически значимы, $p < 0,001$.

Заключение

1. В качестве способов оценки эффективности метода оптимизации алгоритмов, наряду с натурным экспериментом, широко применяются виртуальные эксперименты, в которых производится эмуляция реальных процессов.

2. Разработан способ оценки эффективности нового метода оптимизации алгоритмов диагностирования, включающий формирование виртуальной реальности и создание базы данных наблюдений с использованием метода Монте-Карло, обеспечивающего генерирование случаев в соответствии с эмпирической вероятностью их осуществления.

3. На основе разработанного способа формирования виртуальной реальности создана база данных наблюдений, включающая 508 случаев обращения в организацию автосервиса и проведения диагностирования с использованием разработанного метода оптимизации алгоритмов диагностирования, а также 492 случая в соответствии с существующими алгоритмами диагностирования.

4. Сравнительный анализ эффективности диагностирования автомобилей по разработанному и существующему методам показал, что среднее снижение затрат на диагностирование составило 7,4%.

Список использованных источников

1. Владимирский, И. В. Мировая статистика 2021 : электромобили и подзаряжаемые гибриды // Авторевю. – 2022. – № 2. – С. 47-51.
2. Техническая диагностика. Термины и определения : ГОСТ 20911-89. – Введ. 01.01.91 (взамен ГОСТ 20911-75). – М. : Гос. ком-т по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 10 с.
3. Серебряков, И. А. Анализ существующих алгоритмов диагностирования силовых установок и их эффективности / И.А. Серебряков // Изобретатель. – 2021. – № 1-2 (242-243). – С. 26-31.
4. Серебряков, И. А. Разработка метода оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей // Наука и техника. – 2022. – № 2. – С. 73-81.
5. Танкович, В. С. Разработка оптимального алгоритма диагностирования дизельного двигателя в условиях автотранспортных предприятий: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.22.10 / В.С. Танкович ; Харьковский автомоб.-дорожный ин-т. – Харьков, 1987. – 18 с.
6. Соболев, И. М. Метод Монте-Карло. – М. : Наука, 1968. — 64 с.
7. Электронная система управления двигателем 21129 автомобилей семейства Lada Vesta с контроллером М86 ЕВРО-5 – устройство и диагностика [Электронный ресурс] // ОАО «Автоваз». – Режим доступа : https://zinref.ru/avtomobili/VAZ/001_00_lada_vesta_rukovodstvo/120.htm. – Дата доступа: 30.03.2021.