

УДК 621.431-044.3

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

И.А. СЕРЕБРЯКОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследования типовой практики диагностирования двигателей автомобилей в условиях предприятий автомобильного транспорта и автосервиса. В практике обслуживания и ремонта автомобилей сформированы различные подходы к технологии диагностирования и соответствующая им документация. Установлено, что на дилерских предприятиях автосервиса наиболее широкое применение находит подход, использующий алгоритм диагностирования с выбором последующего шага на каждом действии. Для оценки эффективности диагностического алгоритма разработан показатель, основанный на средней трудоемкости диагностирования. Анализ эффективности применяемых технологий на примере автомобиля Lada Vesta показал, что порядок операций не является оптимальным и его варьирование может влиять на трудоемкость всего алгоритма. В результате проведенных исследований обоснована целесообразность разработки методов оптимизации алгоритмов диагностирования, обеспечивающих снижение трудозатрат вплоть до их минимизации.

Ключевые слова: диагностирование, алгоритм поиска неисправности, диагностическая карта, граф алгоритма диагностирования, эффективность диагностирования, электронная система управления двигателем внутреннего сгорания.

Введение. В современной практике работы предприятий автомобильного транспорта и автосервиса поиск неисправности, как правило, начинается либо с жалобы водителя на работу автомобиля, со ссылкой на несоответствие определенных параметров работы норме (шум, потеря мощности и неравномерность работы двигателя, загорание контрольной лампы на приборной панели), либо при установлении этого же несоответствия при диагностических операциях во время инструментального контроля транспортных средств [1].

Диагностирование можно подразделить на две параллельно существующие составляющие: методы и алгоритмы диагностирования. Методы диагностирования задают технологию выполнения каждой отдельной операции. Для поиска неисправной системы двигателя и отказавшего элемента этой системы могут быть задействованы разные методы: визуальное, компьютерное, стендовое диагностирование и др. Алгоритм диагностирования, в свою очередь, определяет последовательность действий при осуществлении диагностирования¹.

В связи с тем, что двигатели внутреннего сгорания современных легковых автомобилей являются технически сложными объектами, повышаются и требования к диагностированию, поскольку различным неисправностям этих двигателей могут соответствовать одинаковые или очень похожие симптомы. Это, в свою очередь, повышает требования к алгоритмам диагностирования – они должны обеспечивать быструю и точную локализацию места и выявление причин отказа.

Цель исследования состоит в анализе эффективности существующей практики диагностирования, выявлении неоптимальных мест с точки зрения технологии диагностирования и обосновании значимости дальнейших исследований в данном направлении.

Основная часть. *Виды представления диагностической информации.* Завод-изготовитель, его подразделения, другие организации прогнозируют жизненный цикл автомобиля². Они разрабатывают документы, предусматривающие ремонт и диагностирование автомобиля в процессе эксплуатации. Предметом нашего рассмотрения являются алгоритмы выявления неисправностей, от которых может зависеть длительность и стоимость процесса диагностирования. Документация по диагностированию может быть представлена в следующем виде:

1. *Таблица соответствия.* Представляет собой перечень симптомов, в описании каждого из которых приводятся возможные для него неисправности. Данный способ представления диагностической информации подразумевает проверку вариантов в произвольном порядке и положительно зарекомендовал себя, когда каждая неисправность обусловлена своими уникальными симптомами либо же каждому симптому соответствует одна неисправность. Если же симптом присущ большому числу возможных неисправностей (например, «двигатель неустойчиво работает»), применять его неэффективно.

¹ Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ 20911-89. – Взамен ГОСТ 20911-75; введ. РБ 01.01.91. – М. : Гос. ком-т по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 10 с.

² Dealer Management System - Porsche Informatik [Электронный ресурс] / Volkswagen A.G. – Режим доступа: <https://www.porscheinformatik.com/loesungen-und-services/loesungen/dealer-management-system/>. – Дата доступа: 14.06.2022.

2. *Безусловный алгоритм.* Представляет собой перечень действий, по завершению которого диагност должен обнаружить неисправность. Данный способ подразумевает фиксированную последовательность проверок. По факту, это является неким обходом возможных вариантов (безусловный алгоритм диагностирования с безусловной остановкой [2]).

3. *Алгоритм с выбором последующего действия.* В данном случае результат каждого проверочного действия обуславливает выбор следующей проверочной операции. Таким образом, траектория поиска неисправности состоит из нескольких последовательных действий, суммарная трудоемкость которых значительно меньше полного набора операций. Такой алгоритм потенциально позволяет получить результат при минимуме действий.

Алгоритмы диагностирования и диагностические карты. Наиболее широкое распространение в современной практике диагностирования получают условные алгоритмы, которые, как правило, представляются в виде диагностических карт. Их содержание задает порядок операций и правила условных переходов между операциями в зависимости от результата, полученного на предыдущем шаге. Предметом нашего исследования является определение реальных стоимостных характеристик существующих диагностических карт и оценка возможности их оптимизации с целью снижения затрат.

Рассмотрим заводские диагностические карты на практическом примере документации АО «АвтоВАЗ»³ для нашедшего широкое применение двигателя ВАЗ 21129, устанавливаемого на автомобили марки Lada моделей Vesta, XRay, Largus, Granta.

На рисунке 1 представлена диагностическая карта, используемая при возникновении кода неисправности электронной системы управления двигателем, соответствующего некорректному сигналу от датчика температуры охлаждающей жидкости, для автомобиля Lada Vesta.

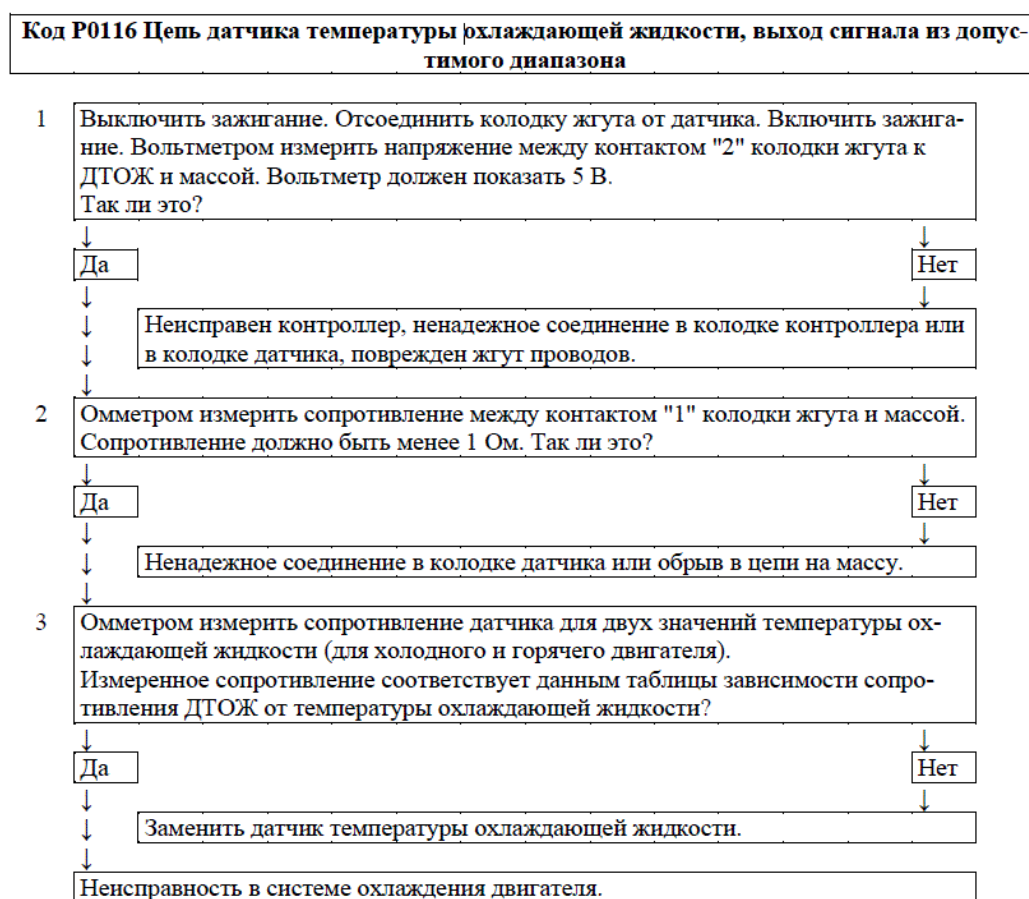


Рисунок 1. – Диагностическая карта проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

³ Электронная система управления двигателем 21129 автомобилей семейства Lada Vesta с контроллером M86 Евро-5 – устройство и диагностика [Электронный ресурс] / АО «АвтоВАЗ». – Режим доступа: https://zinref.ru/avtomobili/VAZ/001_00_lada_vesta_rukovodstvo/138.htm. – Дата доступа: 30.05.2022.

Согласно рисунку, карта содержит следующие элементы: действия (графически обозначены прямоугольниками), переходы между действиями (стрелки). В прямоугольники также заключены логические операторы (да/нет). Работа с картой подразумевает выбор следующей операции в зависимости от результатов проверки на предыдущем шаге. В общем случае карта может содержать безальтернативные переходы. Кроме того, прямоугольниками обозначены конечные точки проверок (их называют исходами).

Основные недостатки диагностических карт такого типа:

- одинаковое графическое обозначение действий (решающих, промежуточных, безальтернативных) затрудняет восприятие информации;
- неоднозначность осуществления диагностических проверок в силу того, что одна операция может содержать несколько действий.

Анализ эффективности диагностической карты. Для оценки эффективности представленной карты необходимо ввести некоторую численную величину, характеризующую эффективность. Исходя из сложившейся практики, в этой роли целесообразнее всего использовать трудоемкость диагностирования. Это обусловлено тем, что завод-изготовитель автомобиля, как правило, предоставляет своей дилерской сети полный перечень нормативов трудоемкости на выполнение всех необходимых операций при техническом обслуживании, ремонте и диагностировании автомобиля. Стоимость диагностирования является объективной величиной, характеризующей процесс диагностирования, но менее пригодна для оценки алгоритма по причине постоянного изменения как себестоимости диагностирования в связи с постоянным изменением цен на широкий перечень ее составляющих, так и стоимости нормо-часа для клиента автосервиса.

Имеющийся вид диагностической карты не позволит объективно оценить ее эффективность в первую очередь по причине того, что в большинстве диагностических карт проверочные операции не являются элементарными проверками [3]. Это означает, что внутри элементов структуры карты (исходов, операций) содержатся проверочные действия, каждое из которых необходимо выделять как отдельное. Например, в диагностической карте (см. рисунок 1), в первом исходе (проистекает из первой операции по логической ветви «нет») содержится целый перечень неисправностей (неисправен контроллер, ненадежное соединение проводов, неисправен жгут проводки), и какая конкретно окажется истинной в определенном случае, необходимо будет установить. Кроме того, целесообразно графически разделить проверочные операции и исходы между собой.

Для удобства восприятия и анализа диагностической карты и последующего расчета стоимости диагностирования ее предлагается представить в следующем виде (рисунок 2).

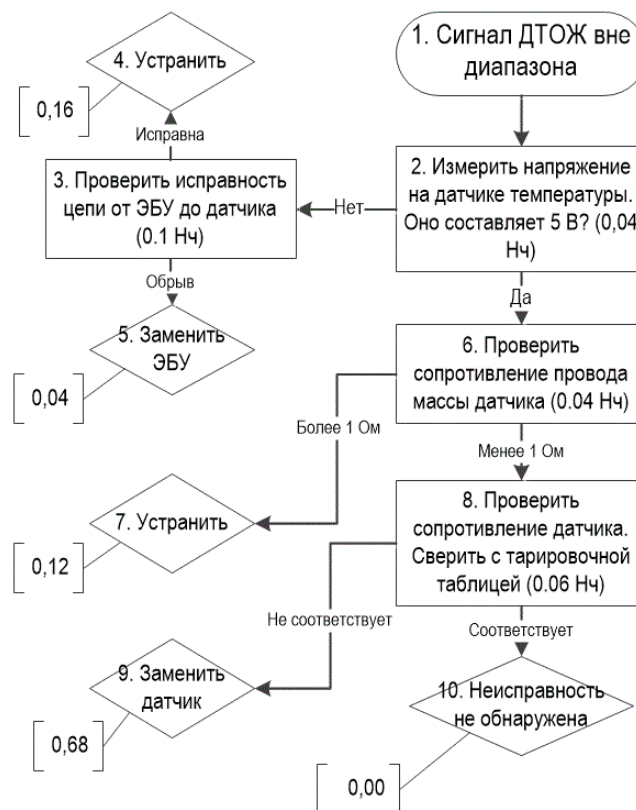


Рисунок 2. – Расширенный граф диагностической карты проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

Следует констатировать, что данный вид обладает свойствами графа [4], а также некоторым дополнительными свойствами, которые будут описаны далее. Назовем его расширенным графом.

Расширенный граф построен следующим образом: начало алгоритма (оно же его заглавие) обозначено овалом. Переходы (связи между элементами) обозначены стрелками, причем стрелки включают в себя логическую сущность (да/нет и т.п.). Проверочные действия обозначены прямоугольниками. В скобках после наименования каждой отдельно взятой проверки указана ее трудоемкость. Проверочные действия имеют логический выбор – выходящие из них стрелки. Алгоритм выполнен в виде дихотомического дерева, т.е. любая из вершин имеет не более 2-х исходов [4]. Исходы (диагнозы, причины неисправности) обозначены ромбами. Они характеризуются вероятностью (вынесена за пределы ромба в квадратных скобках). Все узлы алгоритма имеют цифровой индекс, который указан перед началом описания каждого узла.

Принятые величины трудоемкости и вероятности, характеризующие узлы и исходы, такие как стоимость и вероятность соответственно, базируются на реальной практике предприятия автосервиса Минск-Лада. Вероятности различных отказов были получены анализом статистических данных на основе заказ-нарядов на диагностирование автомобилей. Помимо этого, для ранжирования вероятностей редко возникающих отказов использовался метод экспертных оценок. Вероятность 0.00 у исхода с индексом 10 (см. рисунок 2) означает, что этот исход в данном конкретном случае не является статистически значимым. Трудоемкость взята из перечня операций по ремонту и диагностированию автомобилей, разработанного АО «АвтоВАЗ».

Расчет эффективности алгоритма диагностирования. После проведенных манипуляций карта становится пригодной для дальнейшего анализа. Следует обратить внимание на следующие особенности диагностического графа:

- исходами являются все «висячие» узлы графа, т.е. не имеющие исходящих связей;
- каждый исход связан с началом диагностирования однозначной траекторией, содержащей все родительские элементы по восходящей линии.

В качестве показателя, характеризующего эффективность карты, примем среднюю трудоемкость диагностирования (далее – СТД), единицей измерения которой является норма-час (н-ч). Процесс появления неисправностей и обращения в организации автосервиса является стохастическим, поэтому оценкой величины является ее математическое ожидание, которое вычисляется как сумма математического ожидания затрат по каждому исходу⁴. Затраты по исходу оцениваются как произведение вероятности исхода на трудоемкость всех операций, принадлежащих к траектории, связывающей исход с началом алгоритма. СТД будет рассчитываться по формуле

$$СТД = \sum_{i=1}^n \left(P_i \sum_{j=1}^i S_j \right), \text{ н-ч}, \quad (1)$$

- где i – индексы, относящиеся к исходам;
 j – индексы всех родительских элементов i -го исхода;
 P_i – вероятность i -го исхода;
 S_j – трудоемкость диагностирования j -й операции;
 n – количество исходов.

Проведем расчет СТД для диагностического алгоритма проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости по формуле (1):

$$СТД = P_4 (S_3 + S_2) + P_5 (S_3 + S_2) + P_7 (S_6 + S_2) + P_9 (S_8 + S_6 + S_2) + P_{10} (S_8 + S_6 + S_2) = 0,133 \text{ н-ч}.$$

Для удобства восприятия и расчета в формуле (1) индексы трудоемкостей и вероятностей соответствуют индексам операций, к которым они относятся. В результате полученная средняя трудоемкость диагностирования для первоначальной структуры диагностической карты составила 0,133 н-ч. Изменим структуру карты, поменяв местами операцию с индексом 8 на операцию с индексом 2 с соответствующими им исходами. Получим алгоритм, соответствующий первоначальному по полноте диагностирования, однако иной с точки зрения математического ожидания трудоемкости [5]. Новая структура алгоритма представлена на рисунке 3. Принятый граф алгоритма диагностирования назван модернизированным.

Проведем расчет СТД для модернизированного графа алгоритма, представленного на рис. 3, по формуле (1):

$$СТД = P_9 \cdot S_8 + P_7 (S_8 + S_6) + P_5 (S_3 + S_2) + P_4 (S_8 + S_6 + S_2 + S_3) + P_4 (S_8 + S_6 + S_2 + S_3) + P_{10} (S_8 + S_6 + S_2) = 0,1 \text{ н-ч}.$$

⁴ Танкович, В.С. Разработка оптимального алгоритма диагностирования дизельного двигателя в условиях автотранспортных предприятий : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.10 / В.С. Танкович ; Харьков. автомоб.-дорож. ин-т. – Харьков, 1987. – 18 с.

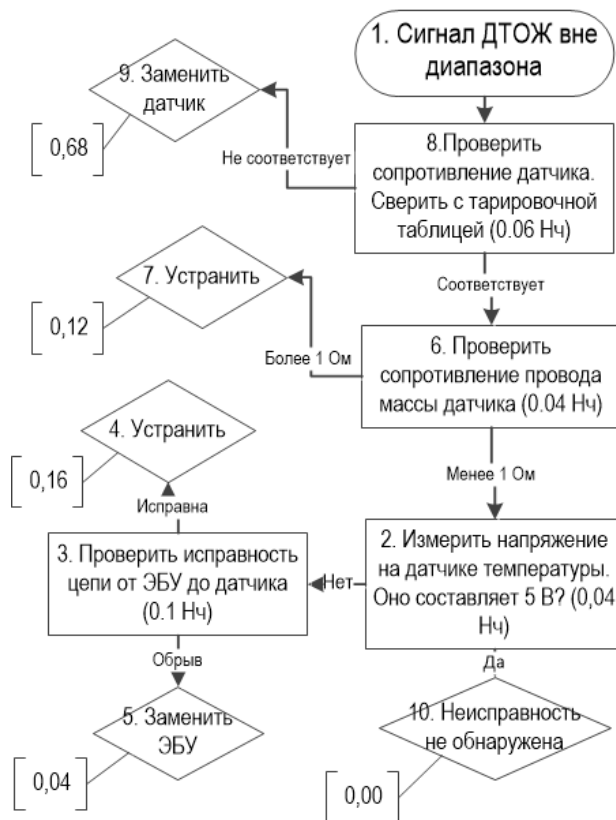


Рисунок 3. – Модернизированный расширенный граф диагностической карты проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

Полученный результат означает, что, изменив структуру диагностической карты, т.е. сохранив ее полноту и свойства входящих в нее элементов, но изменив связи между ними и, как следствие, порядок проводимого диагностирования, удалось добиться снижения трудоемкости диагностирования с 0,133 н-ч до 0,101 н-ч, или на 24,8%. Стоит также отметить, что указанное снижение касается лишь отдельно взятого процесса поиска неисправности⁵. В перечень работ, включаемых в заказ-наряд на диагностирование автомобиля, помимо непосредственно поиска неисправности, входит также ряд обязательных к исполнению операций, которые на данный момент не подвержены оптимизации.

Показанный пример демонстрирует, что используемые алгоритмы диагностирования не всегда являются оптимальными [6]. Автор выдвигает предположение о необходимости разработки, по возможности, простого и наглядного метода оптимизации структуры алгоритмов диагностирования силовых установок автомобилей.

Заключение. На основе проведенных исследований сделано заключение о перспективности и целесообразности разработки методов оптимизации диагностических алгоритмов, обеспечивающих минимизацию общих трудозатрат диагностирования и обладающих возможностью как можно более простого и быстрого внедрения в практику предприятий автосервиса. Разрабатываемые методы должны учитывать соотношение вероятностей возможных неисправностей и трудоемкости операций по их выявлению. Данные о фактических распределениях вероятностей исходов и трудоемкостей операций должны быть получены на основе статистического анализа практических данных работы предприятий автосервиса [7].

Выводы. 1. В существующей практике диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей наиболее распространены условные алгоритмы поиска неисправностей, которые в практической реализации приобретают форму диагностических карт.

2. Для целей анализа эффективности диагностическая карта была преобразована к виду расширенного дихотомического графа, в котором узлы, представляющие собой выполняемые операции и возможные исходы, содержат дополнительную информацию о вероятностях событий и трудоемкости операций.

⁵ Серебряков, И.А. Совершенствование процесса диагностирования силовых установок автомобилей / И.А. Серебряков // Сб. материалов IX форума вузов инженер.-технол. профиля Союз. государства. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ред.: С.В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2020. – С. 70–71.

3. На примере диагностической карты проверки датчика топлива показано, что алгоритм диагностирования не является оптимальным, а модификация расширенного графа, направленная на снижение уровня трудоемкости, позволила снизить математическое ожидание с 0,133 н-ч до 0,100 н-ч, или на 24,8%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савич, Е.Л. Инструментальный контроль автотранспортных средств : учеб. пособие / Е.Л. Савич, А.С. Кручек. – Минск : Новое знание, 2008. – 399 с.
2. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики : в 2 кн. / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян ; под ред. П.П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1981. – Кн. 2 : Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства. – 320 с.
3. Бахвалов, С.В. Анализ оптимальных алгоритмов технического диагностирования / С.В. Бахвалов, А.М. Дунаев // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 7. – С. 55–59.
4. Казимиров, Н.И. Архетипы математики: общие методы, приемы, конструкции, идеи математики и ее оснований / Н.И. Казимиров. – М. : Юстицинформ, 2019. – 612 с.
5. Ефанов, Д.В. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах : учеб. пособие / Д.В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 49 с.
6. Аржененко, А.Ю. Оптимальные бинарные вопросники / А.Ю. Аржененко, Б.Н. Чугаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
7. Мириленко, А.П. Сравнительный анализ эффективности оптимизированных алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей / А.П. Мириленко, И.А. Серебряков // Изобретатель. – 2022. – № 1–2 (246–247). – С. 25–30.

REFERENCES

1. Savich, Ye.L. & Kruchek, A.S. (2008). *Instrumental'nyy kontrol' avtotransportnykh sredstv [Instrumental control of vehicles]*. Minsk: Novoye znaniye. (In Russ.).
2. Parkhomenko, P.P. & Sogomonyan Ye.S. (1981). *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Kn. 2. Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva [Fundamentals of technical diagnostics. Book 2. Optimization of diagnostic algorithms, hardware]*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
3. Bakhvalov, S.V. & Dunayev, A.M. (2016). Analiz optimal'nykh algoritmov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Analysis of optimal algorithms for technical diagnostics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]*, (7), 55–59. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kazimirov, N.I. (2019). *Arkhetipy matematiki: obshchiye metody, priyemy, konstruksii, idei matematiki i yeye osnovaniy [Archetypes of mathematics: general methods, techniques, constructions, ideas of mathematics and its foundations]*. Moscow: Yustitsinform. (In Russ.).
5. Efanov, D.V. (2014). *Postroyeniye optimal'nykh algoritmov poiska neispravnostey v tekhnicheskikh ob'yektakh [Construction of optimal algorithms for troubleshooting in technical objects]*. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS (In Russ.).
6. Arzhenenko, A.Yu. & Chugayev, B.N. (1989). *Optimal'nyye binarnyye voprosniki [Optimal binary questionnaires]*. Moscow: Energo-atomizdat. (In Russ.).
7. Mirilenko, A.P. & Serebryakov, A.P. (2022). *Sravnitel'nyy analiz effektivnosti optimizirovannykh algoritmov diagnostirovaniya dvigateley avtomobiley [Comparative analysis of the effectiveness of optimized algorithms for diagnosing car engines]*. *Izobretatel' [Inventor]*, 1–2(246–247), 25–30. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 04.07.2022

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ALGORITHMS FOR DIAGNOSING INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF A CARS

I. SEREBRYAKOV

The article presents the results of a study of the typical practice of car engines diagnosing in the conditions of different car services. In the practice of car maintenance and repair are formed various approaches to diagnostic technology and the corresponding documentation. Established that the most widely used approach at car service dealerships is the approach that uses the diagnostic algorithm with the choice of the next step for each action. To assess the effectiveness of the diagnostic algorithm, an indicator based on the average complexity of diagnosing has been developed. An analysis of the effectiveness of the technologies used on the example of the Lada Vesta. Showed that the order of operations is not optimal and its variation can affect the complexity of the entire algorithm. The research results that the expediency of developing methods for optimizing diagnostic algorithms that ensure a reduction in labor costs up to their minimization.

Keywords: diagnostics, troubleshooting algorithm, diagnostic map, diagnostic algorithm graph, diagnostic efficiency, electronic control system for internal combustion engine.