

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”

ISSN 1727-7337 (print)

ISSN 2663-2217 (online)

**АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНА
ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ**

7 (167)

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Тематичний випуск «Проблеми двигунобудування»

Видання засноване у 1993 р

Виходить 6 разів на рік

Харків "ХАІ" 2020

Засновник журналу **Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"**

Затверджено до друку вченою радою Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", протокол № 1 від 28 серпня 2020 р.

Головний редактор **Сергій Валерійович Єпіфанов**, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Редакційна колегія

- С. М. Фірсов**, д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора), проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- Л. О. Базима**, канд техн. наук, доц., доц. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- О. О. Баранов**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. О. Богуславський**, д-р техн. наук, проф., Президент, генеральний конструктор АТ "Мотор Січ";
- П. Г. Гакал**, д-р техн. наук, доц., зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- О. В. Дегтярев**, д-р техн. наук, академік НАН України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік Міжнародної академії астронавтики, Віце-президент Міжнародної астронавтичної федерації, Генеральний директор ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля;
- В. І. Дешко**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Національний технічний університет "ХПІ";
- Є. А. Дружинін**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- С. Р. Ігнатів**, д-р техн. наук, проф., декан факультету літальних апаратів, Національний авіаційний університет;
- Д. М. Клец**, д-р техн. наук, проф., перший проректор, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет;
- А. О. Костіков**, д-р техн. наук, проф., заст. директора з НР, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного;
- М. Д. Кошевий**, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- І. Ф. Кравченко**, д-р техн. наук, Директор, Генеральний конструктор ДП "Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро "Прогрес" імені академіка О.Г. Івченка;
- Г. О. Кривов**, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Голова правління - Генеральний директор ПАТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології»;
- А. С. Кулік**, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. В. Лукін**, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. О. Меньшиков**, д-р фіз.-мат. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. П. Мигаль**, д-р техн. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- О. Г. Ніколаєв**, д-р фіз.-мат. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. В. Павліков**, д-р техн. наук, проф., проректор з НДР, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. С. Проценко**, д-р фіз.-мат. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- Ю. О. Романенков**, д-р техн. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- А. О. Таран**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- І. Б. Туркін**, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- П. О. Фомичов**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- В. С. Харченко**, д-р техн. наук, проф., заслужений винахідник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- О. М. Чугай**, д-р техн. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- І. В. Шостак**, д-р техн. наук, проф., проф. каф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;
- Vladimir A. Golovanovskiy**, PhD, Professor, Curtin University of Technology, Australia;
- Anatoliy V. Gorbenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, School of Computing, Creative Technologies and Engineering, Leeds Beckett University, United Kingdom;
- Michael Schenk**, Univ.-Professor, Doctor of Technical Sciences, Honorary Professor, multiple honorary doctor, Director of the Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF in Magdeburg, Germany.

Відповідальний секретар **О. Б. Лешенко**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24442-14382Р від 14.05.2020 р.

За вірогідність інформації несуть відповідальність автори. В журналі публікуються статті українською, англійською та російською мовами після зовнішнього та внутрішнього рецензування.

Репродукції не повертаються. При передруку матеріалів посилання на журнал обов'язкові.

Електронний варіант журналу розміщений на сайті <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/akt>

Науково-технічний журнал «Авіаційно-космічна техніка і технологія»

- входить до затвердженого ДАК Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за спеціальностями 113, 121, 122, 124, 126, 131, 132, 134, 141, 142, 151, 152, 153, 173, 272, 275 (наказ МОН України № 975 від 11.07.2019 р.);

- зберігається у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» та публікується у відповідних тематичних серіях українського реферативного журналу «Джерело» (вільний онлайн-доступ до ресурсів на вебсервері <http://www.nbuv.gov.ua>);

- зберігається у реферативній базі даних Всеросійського інституту наукової і технічної інформації (ВІНІТІ) РАН і публікується у відповідних тематичних серіях РЖ (вільний онлайн-доступ до ресурсів на вебсервері <http://www.viniti.ru>);

- включений до міжнародних бібліометричних та наукометричних баз даних: наукової електронної бібліотеки eLIBRARY.RU; DOAJ; Index Copernicus; CiteFactor; Academic Keys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar.

ЗМІСТ

Проектування літальних апаратів

Лось А. В., Рябков В. И., Середя Т. Н.
Проблемы создания самолетов транспортной категории с учетом экологических ограничений ...5

Теорія і робочі процеси авіаційних двигунів і енергоустановок

Ткач М. Р., Прокурін А. Ю., Митрофанов О. С., Галинкін Ю. М.
Підвищення ефективності технології отримання водню шляхом використання регенераційного контуру з роторно-поршневою розширювальною машиною 12

Усенко В. Ю., Дорошенко К. В., Хижняк М. В.
Вплив зазору між рядами співвісного повітряного гвинта на тягу 19

Романенко И. С., Белозуб А. В.
Анализ особенностей моделирования процессов в топливных шестеренных насосах ГТД 24

Епифанов С. В., Ли Цицзе
Анализ погрешностей экспериментального определения динамических характеристик термодары в условиях двигателя с использованием скачкообразного воздействия 31

Конструкція і міцність авіаційних двигунів і енергоустановок

Придорожный Р. П., Шереметьев А. В., Зиньковский А. П.
Влияние ползучести материала на работоспособность лопаток соплового аппарата турбины высокого давления 41

Снежной Г. В., Снежной В. Л.
Магнитометрический подход к изучению влияния углерода и азота на коррозионную стойкость аустенитных хромоникелевых сталей 47

Кухтин Ю. П., Шакало Р. Ю.
Снижение вибронапряженности попарно бандажированных рабочих лопаток турбины 52

Технології виробництва об'єктів авіаційно-космічної техніки

Аджемский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В.
Перспективы применения аддитивных технологий в авиа- и ракетостроении 59

Педаш А. А., Касай П. А., Клочихин В. В., Шило В. Г.
Структура и свойства деталей, полученных селективным лазерным сплавлением после испытания на малоцикловую усталость 66

CONTENTS

Aircraft Design

Los A., Ryabkov V., Sereda T.
Problems of creation of aircraft category planes according to environmental limitations 5

Theory and operation of aerospace engines and power plants

Tkach M., Proskurin A., Mytrofanov O., Halynkin Y.
Increasing the efficiency of hydrogen production technology by using a regeneration circuit with a rotary-piston expander machine 12

Usenko V., Doroshenko E., Khyzhniak M.
Effect of the clearance between rows of coaxial propfan on thrust 19

Romanenko I., Bilohub O.
Fuel gear pump of gas turbine engine operating processes simulation issues analysis 24

Yepifanov S., Qijie Li
Error analysis of thermocouple dynamic performances experimental determining in engine conditions using step response 31

Design and strength of aerospace engines and power plants

Prydorozhnyi R., Sheremetyev A., Zinkovskii A.
Influence of creep of material of a high pressure nozzle vanes on their operability 41

Snizhnoi G., Snizhnoi V.
Magnetometric method for investigation the effect of carbon and nitrogen on the corrosion resistance of austenitic chromium-nickel steels 47

Kukhtin Yu., Shakalo R.
Reducing vibration tension of pairwise shrouded blades of turbine 52

Aerospace production engineering

Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R.
Prospects for the application of additive technologies in aircraft and rocket engineering 59

Pedash O., Kasay P., Klochikhin V., Shylo V.
Structure and properties of SLM-manufactured parts after LCF-testing 66

**Вишнепольский Е. В., Павленко Д. В.,
Двирник Я. В.**

Прогнозируемые эффекты упрочнения алмазным
выглаживанием деталей полученных с помощью
селективного лазерного спекания..... 73

Інформаційні технології

**Буряченко А. Г., Бурунов Д. С.,
Грудинкин В. М., Таранишин А. О.**

Стенд-имитатор авиадвигателя как
универсальное средство обеспечения
разработки и испытаний регуляторов 83

**Епифанов С. В., Зеленский Р. Л.,
Бондаренко А. В.**

Исследование проблемы формирования
зависимости параметров динамической модели
двухвального ТРДД от режима работы 89

Тамаргазін О. А., Приймак Л. Б.
Нейромережева інтерполяція параметрів
багаторежимної динамічної моделі
авіаційного двигуна (англ. мовою) 98

Оганян И. В.

Математическая модель топливного
насоса-регулятора турбовального
двигателя вертолета 105

Товкач С. С.

Підхід нечіткої кластеризації
в розподілених інформаційних системах
авіаційних двигунів 113

**Варбанец Р. А., Залож В. И., Тарасенко Т. В.,
Белоусова Т. П., Ерыганов А. В.**

Метод аналитической синхронизации
данных мониторинга рабочего процесса
транспортных дизелей в эксплуатации 118

Миргород В. Ф., Гвоздева И. М.

Оцінка потужності критеріїв тренду 129

**Кіянівський М. В., Цивінда Н. І.,
Пікільняк А. В., Третяк В. В.**

Вибір моделей для адаптивного
керування надійністю промислового
обладнання «за станом» 137

Хрулев А. Э., Клименко В. Г.
Особенности построения и применения
логических методов поиска причин
отказов поршневых двигателей
внутреннего сгорания в эксплуатации 146

Інформаційне повідомлення 158

Алфавітний покажчик 159

**Vyshnepolskyi E., Pavlenko D.,
Dvyrnyk Y.**

Predicted effects of strengthening by diamond
ironing of details obtained
by selective laser sintering 73

Information Technology

**Buryachenko A., Burunov D.,
Grudinkin V., Taranishin A.**

Stand imitator of the engine
as a universal means of ensuring
the development and testing of regulators 83

Yepifanov S., Zelenskii R., Bondarenko O.

Researching of relations forming between
parameters of two-spool turbopan
dynamic model and operation mode 89

Tamargazin A., Pryimak L.
Neural network interpolation parameters
of a multi-mode dynamic model
of the aircraft engine 98

Ohanian I.

Mathematical model of fuel
pump-regulator of helicopter
turbo-shaft engine 105

Tovkach S.

Approach of fuzzy clustering
in distributed information systems
of aviation engines 113

**Varbanets R., Zalozh V., Tarasenko T.,
Bilousova T., Yeryganov O.**

The method of analytical synchronization
of the working process data monitoring
in transport diesel engines operating 118

Myrhorod V., Hvozdeva I.

Estimation of power of trend criteria 129

**Kiyanovskyi M., Civinda N.,
Pikilnyak A., Tretyak V.**

Choice of models for adaptive control
by reliability of industrial
equipment «on state» 137

Khrulev A., Klimenko V.
Features of composing and application
of logical methods for searching of failure
causes of internal combustion piston
engines in operation 146

Information message 158

Index 159

УДК 621.432:620.192

doi: 10.32620/akt.2020.7.20

А. Э. ХРУЛЕВ¹, В. Г. КЛИМЕНКО²¹ *Международное моторное бюро, Немешаево, Киевская обл., Украина*² *Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина*

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКА ПРИЧИН ОТКАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Несмотря на успехи в исследованиях и разработке конструкций современных двигателей внутреннего сгорания для транспортных средств различного назначения, включая авиационные, к настоящему времени не создано надежных методик для определения причин их отказов, а применение на практике известных методик, в том числе, диагностики технического состояния двигателей, не только требует большой трудоемкости и высокой квалификации персонала, но во многих случаях фактически неэффективно. Особенно это касается тяжелых эксплуатационных повреждений, возникающих при разрушении деталей и сопровождающихся нарушением синхронизации их возвратно-поступательного и вращательного движения. С другой стороны, выполненное исследование показывает, что причины неисправностей и отказов двигателей могут определяться и логико-вероятностными методами, в том числе, на основе анализа дерева отказов, с привлечением имеющегося опыта исследования различных неисправностей. Однако, использовать известные модели и методики, построенные на базе анализа дерева отказов, в задачах поиска причин отказов не всегда возможно, поскольку такие методики разработаны для задач расчета характеристик надежности разрабатываемых двигателей, а не поиска причин их отказов в эксплуатации. Решение указанной задачи было найдено в несколько этапов. Вначале путем структурирования признаков было составлено дерево отказов, логически описывающее причинно-следственные связи между событием отказа и вызвавшим его начальным повреждением, отдельно по каждому из выбранных для анализа видов отказов, связанных с тяжелыми повреждениями двигателей исследуемого типа. Далее для конечного числа выбранных видов отказов было разработано модифицированное (перевернутое) дерево отказов, позволяющее выполнять простой логический анализ в обратном по отношению к общепринятому направлению – от события отказа системы к базисным событиям, инициирующим отказ. После этого было составлено общее для рассмотренных видов отказов модифицированное дерево отказов. В результате использования предлагаемой методики на практике стало возможным определить причины отказа двигателей с достаточной достоверностью при минимальных затратах времени.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания; неисправность; отказ; логический метод; анализ дерева отказов.*

Введение

Большие усилия и средства, длительное время вкладывавшиеся в научные исследования, проектно-конструкторские работы и производство поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), значительно повысили их долговечность и надежность в эксплуатации [1]. Однако достигнутое техническое совершенство новых конструкций и производственных технологий не может полностью исключить возможность возникновения неисправностей и отказов в современных двигателях, для эффективного устранения которых требуется правильное определение их причин [2].

И именно с проблемой правильного определения причин неисправностей и отказов сталкиваются ремонтные организации и эксплуатанты транспортных средств [3]. При этом одним из факторов, пре-

пятствующим решению данной проблемы, является отсутствие методик, с помощью которых можно было бы сравнительно просто, но в то же время с необходимой степенью достоверности определять причины неисправностей поршневых двигателей в эксплуатации [4].

Обычно трудности в создании таких методик вызваны сложностью или даже невозможностью, в отличие от исследований процессов и конструирования двигателей, формализовать процессы повреждения, выявить в них закономерности, пригодные для составления универсальных и простых алгоритмов, чтобы далее описать их простыми формулами. Кроме того, различия в конструкции двигателей требуют сбора и обработки больших объемов статистических данных по характеру и особенностям неисправностей и разрушений для конкретных двигателей.

В результате правильное определение причин неисправности двигателей на практике чаще всего удается только специалисту со значительным экспертным опытом исследования причин неисправностей [2, 4] – в других случаях эксплуатант рискует ошибиться, получить повторный отказ и удвоить, а иногда и утроить собственные затраты на ремонт двигателя транспортного средства. Таким образом, есть все основания утверждать, что несмотря на серьезные усилия и достигнутые успехи в исследованиях и конструировании поршневых ДВС, к настоящему времени так и не были созданы надежные методики, позволяющие с необходимой для практики достоверностью находить причину их неисправности (отказа).

1. Анализ последних исследований и публикаций

Известные на сегодня способы и методики определения причин неисправностей и отказов поршневых ДВС в эксплуатации можно разделить на три группы.

Первая группа представляет собой разного рода и детальной проработанности таблицы неисправностей, в которых прописаны основные симптомы неисправной работы и соответствующие им причины [3, 5], что, на первый взгляд, должно помочь потребителю выполнить поиск причины неисправности (troubleshooting).

Тем не менее, такое простое представление, при всей его доступности и понятности даже для неподготовленных эксплуатантов – владельцев транспортных средств, водителей и операторов, имеет не только достаточно низкую практическую ценность во многих реальных случаях неисправностей, но и создает трудности при определении их причины. Это связано с многозначностью указываемых причин неисправности – таблицы обычно дают при схожести признаков десятки возможных причин, причем чем более подробно составлена таблица, тем больше причин она дает [4]. Вследствие этого использование таблиц на практике требует настолько большой трудоемкости, что фактически неэффективно, в результате потребители в эксплуатации, как правило, затрудняются определить по такой методике причину неисправности.

Вторая группа методик объединяет справочники неисправностей [6, 7]. В целом это те же самые таблицы неисправностей, но иллюстрированные фотографиями поврежденных деталей и снабженные подробным описанием самих повреждений и их причин. Несмотря на более солидный вид, данный способ страдает теми же проблемами неоднозначности – чтобы найти причину неисправности, в общем

случае требуется выполнить десятки проверок различных версий.

Общим для обеих методик является то, что фактически они требуют не просто технических знаний, а специальной подготовки и экспертного опыта, что препятствует их применению на практике – неподготовленный эксплуатант или работник сервисной службы, скорее всего, не сможет с их помощью найти неисправность, а высококвалифицированный специалист вполне способен найти неисправность и без них, положившись на свои знания и опыт. Кроме того, поскольку таблицы и справочники неисправностей составляются, главным образом, производителями комплектующих, в них практически невозможно найти описаний производственных дефектов. С одной стороны, это вполне логично, поскольку указание дефекта в технической литературе производителя воспринимается средним статистическим потребителем как признание производителем собственного брака. Однако, с другой стороны, отсутствие в справочнике или таблице упоминания о производственных причинах неисправностей сразу делает эту информацию неполной и не вполне достоверной.

Третья группа объединяет методики диагностики технического состояния ДВС [8, 9]. В целом это давно и хорошо научно разработанные методики, позволяющие с помощью измерения определенных параметров и их соответствующей математической обработки устанавливать различные неисправности. Некоторые диагностические методики используются в качестве базовых алгоритмов в ряде диагностических приборов (например, в мотор-тестерах [10]), что помогает обнаружить различные отклонения в работе двигателя и даже найти причины отдельных неисправностей. Однако не все диагностические методики востребованы на практике, где их применение ограничено, с одной стороны, необходимостью иметь специальные знания и серьезную подготовку (например, вряд ли можно ожидать от механика сервисного предприятия фундаментальных научных знаний и способностей их применить, используя научные методы при ремонте двигателя), а с другой – высокой стоимостью диагностического оборудования. Кроме того, многие виды повреждений и отказов в механической части двигателей, как правило, плохо диагностируются, а в ряде случаев вообще не выявляются диагностическими методами.

2. Постановка задачи

Целью исследования является разработка логической методики для определения причин неисправностей и отказов ДВС в эксплуатации, приме-

нимой не только специалистами экспертного уровня, но и средней квалификации. Для достижения поставленной цели использован логико-вероятностный метод анализа дерева отказов [11], ранее применявшийся при исследовании неисправностей различных технических систем, включая ДВС, в том числе, для расчета параметров надежности [12, 13]. Однако для определения причин неисправностей поршневых двигателей данный метод предложен впервые.

3. Методика составления дерева отказов

На предварительном этапе исследования формулировались основные положения предлагаемой методики, был выбран общий подход и составлен логический алгоритм. В качестве объекта предварительного исследования был выбран агрегат ДВС – турбокомпрессор наддува, на котором апробирована предлагаемая методика, с целью дальнейшего распространения ее применения на весь двигатель в целом.

Для решения задачи был применен метод анализа дерева отказов [14]. Как известно, дерево отказов (Fault Tree Analysis – FTA) – это многоуровневая графологическая структура (граф) причинных взаимосвязей в системе, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения (рис. 1). Анализ дерева отказов является распространенным методом моделирования надежности сложных технических систем, обычно выполняемым на стадии их проектирования [11].

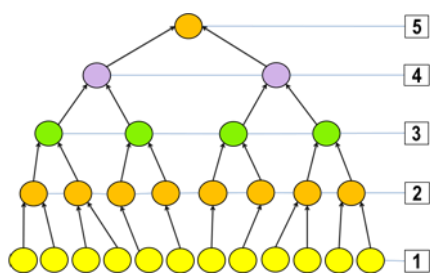


Рис. 1. Дерево отказов: возможные воздействия (1) на систему вызывают повреждения (2), что приводит к отказу элементов (3), затем составных частей (4) и всей системы в целом (5)

Дерево отказов определяет причинно-следственные связи отказа всей системы с отказами ее подсистем и отдельных элементов, а также другими событиями и воздействиями (см. рис. 1). Последовательную детализацию событий, связанных с отказами системы, обычно проводят в направлении от следствия к причине отказа (сверху вниз), но сам анализ выполняется в обратном направлении – "от

причины к следствию", а поскольку он проводится на этапе проектирования изделия, такой анализ позволяет рассчитать вероятностные характеристики надежности.

Составление дерева отказов рассматриваемого агрегата ДВС было выполнено в несколько последовательных приближений [14]:

1) структурирование объекта исследования путем разбиения его на отдельные узлы и объединение их в блок-схему (рис. 2),

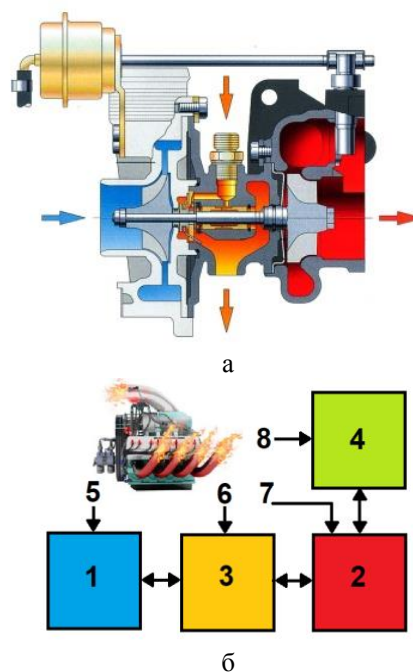


Рис. 2. Турбокомпрессор (а) и его блок-схема (б): 1– компрессор, 2– турбина, 3– подшипниковый узел, 4– система управления (клапан перепускной заслонки типа Wastegate, турбина с регулируемым сопловым аппаратом VNT или другое, с приводным механизмом и блоком управления), внешние воздействия на турбоагнетатель (от ДВС), в том числе: 5– впускная система ДВС, 6– масляная система и картер ДВС, 7– цилиндры ДВС и выпускной коллектор, 8– система управления ДВС

2) определение возможных источников, причин и признаков неисправностей для данного объекта,

3) детализация и структурирование признаков и причин отказов по выделенным блокам (узлам) объекта с их подробным описанием,

4) составление прямого дерева отказов объекта по одной выбранной причине неисправности,

5) расширение прямого дерева отказов на другие причины неисправностей объекта,

6) модификация прямого дерева отказов с целью упрощения логической схемы и ее анализа – допущение логической связи рассматриваемого события с несколькими предыдущими событиями,

7) реверс прямого дерева отказов объекта в обратное с целью приведения его к виду, позволяющему выполнять логический поиск причины отказа.

Следует отметить, что данный вид логического анализа не предполагает каких-либо расчетов вероятности отказа, как это обычно принято при оценке надежности проектируемых объектов [11] – априори предполагается, что такой анализ уже был выполнен разработчиком при проектировании объекта. Тогда, если допустить, что в эксплуатации отказ уже случился, основной задачей логического анализа дерева отказов будет не вывод формул для расчета вероятности возникновения, а логический поиск самой причины уже произошедшего отказа.

В результате такого подхода можно получить логический граф в виде модифицированного обратного (перевернутого) дерева отказов, в котором четко выделены не только промежуточные состояния

узлов и элементов, но и подробно прописаны признаки, по которым водитель и/или сервисный центр обычно устанавливают событие (факт) неисправности или отказа (рис. 3). Тогда при наличии всех признаков отказа нетрудно определить его причину, просто следуя логической цепи графа.

Однако непосредственно перенести и распространить полученные в [14] результаты на весь двигатель в целом не представляется возможным. Причина заключена в том, что в турбокомпрессоре наддува количество узлов и деталей невелико, а все они тесно взаимосвязаны – вращение ротора происходит с высокой скоростью, когда даже незначительное нарушение режима работы одного элемента не только быстро развивается по времени, но и дает большой масштаб повреждений многих деталей [14, 15].

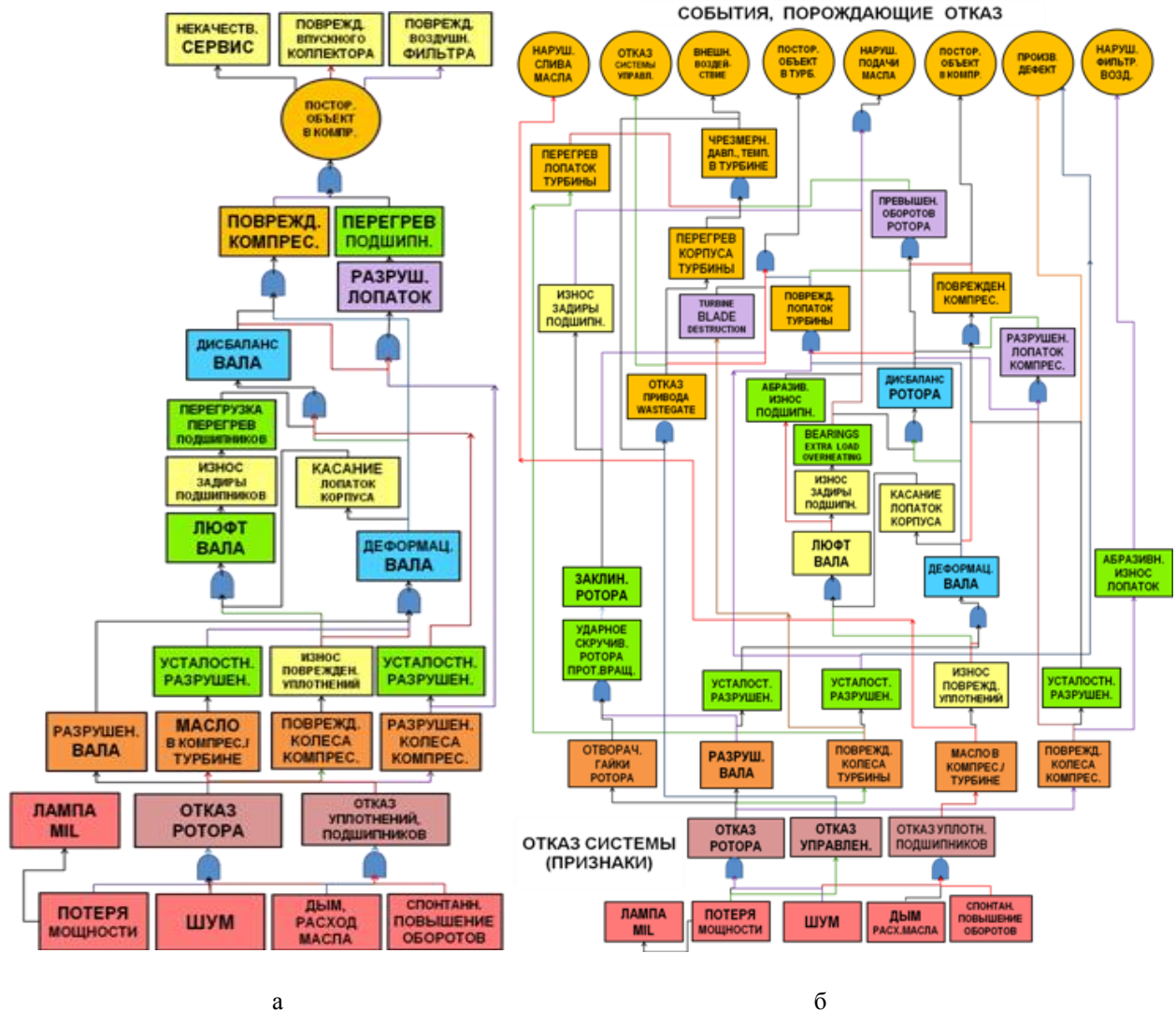


Рис. 3. Общий вид логических графов [14]: пример обратного дерева (а) одного отказа (попадание постороннего предмета в турбокомпрессор) как составной части модифицированного обратного (перевернутого) дерева отказов всего агрегата (б)

Как показывает практика [2 - 4], в ДВС нет такой глобальной взаимосвязи между узлами и деталями. Наоборот, в эксплуатации ДВС отказы чаще вызваны локальными повреждениями отдельных сопряженных деталей, которые нередко происходят без расширения повреждений на многие другие элементы, узлы, цилиндры и т.д. В соответствии с этим примененный при исследовании агрегата способ структурирования может оказаться неэффективным для всего двигателя в целом.

4. Построение логического графа дерева отказов двигателя

Действительно, структурирование и разбиение всего ДВС, в том числе, многоцилиндрового, на отдельные узлы – способ не новый и довольно часто встречается в различных исследованиях с использованием анализа дерева отказов с целью расчета характеристик надежности [12, 13]. Однако если решается задача поиска причины отказа, то она формулируется не как поиск формулы и не расчет вероятности отказа (для любого выпускаемого двигателя такие исследования должны быть уже проведены разработчиком), а как определение причины отказа, который уже случился. В таком случае структурирование объекта ничего не дает, и работу следует начинать с определения возможных источников, причин и признаков неисправностей для данного объекта в целом, т.е. структурирования самого события отказа.

Помимо этого, при разработке логического графа дерева отказов ДВС целесообразно принять ограничение по количеству рассматриваемых видов отказов. Действительно, представляется неоправданным чрезмерное расширение дерева отказов на многие или вообще на все возможные неисправности, поскольку такая работа чрезвычайно сложна и вряд ли имеет смысл. В данном исследовании круг рассматриваемых видов отказов ДВС был ограничен наиболее серьезными, которые вызывают так называемые тяжелые повреждения, связанные с нарушением синхронизации возвратно-поступательного и вращательного движения деталей, для чего причины и признаки рассматриваемых отказов были сведены в соответствующую таблицу [16] и включали, в том числе:

- 1) разрушение шатуна после гидроудара вследствие попадания в цилиндр различных жидкостей,
- 2) разрушение клапана вследствие различных производственных дефектов,
- 3) разрушение подшипников коленвала и шатуна вследствие нарушения смазки,
- 4) нарушение осевой фиксации и разрушение

поршневого пальца вследствие производственных дефектов.

Из полученных в [16] данных следует, что для составления дерева отказов такого сложного объекта как ДВС наиболее важным представляется разбиение (структурирование) признаков на следующие группы – главные, подтверждающие (главный) и уточняющие (вид и место повреждающего воздействия). В соответствии с этим для каждого из рассмотренных отказов можно представить общую логическую схему прямого анализа в направлении от причины к событию отказа двигателя в виде простого структурного графа (рис. 4).

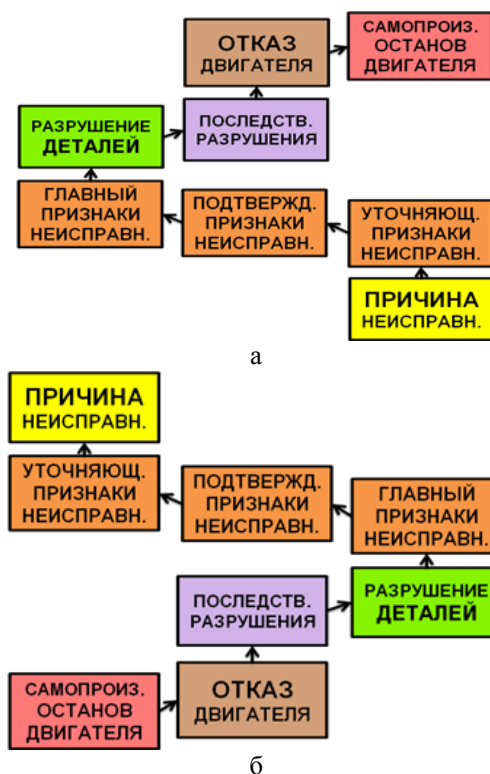


Рис. 4. Прямая (а) и обратная (б) логические схемы (направление анализа – снизу вверх), описывающие данные по отдельно выделенной неисправности (отказу) из числа приведенных в [16]

Основываясь на такой логической схеме, трудно составить детализированный граф по каждому отказу из числа рассматриваемых. На рис. 5 представлен модифицированный и обратный граф для отказа, связанного с гидроударом в одном из цилиндров ДВС от попадания воды, масла, топлива или охлаждающей жидкости [17].

Вначале такой граф строится как модифицированный (у каждого события может быть несколько входов, но только один выход) и прямой, т.е. в направлении от причины к самому событию отказа. После построения прямой граф реверсируется с целью получения логической схемы для анализа в об-

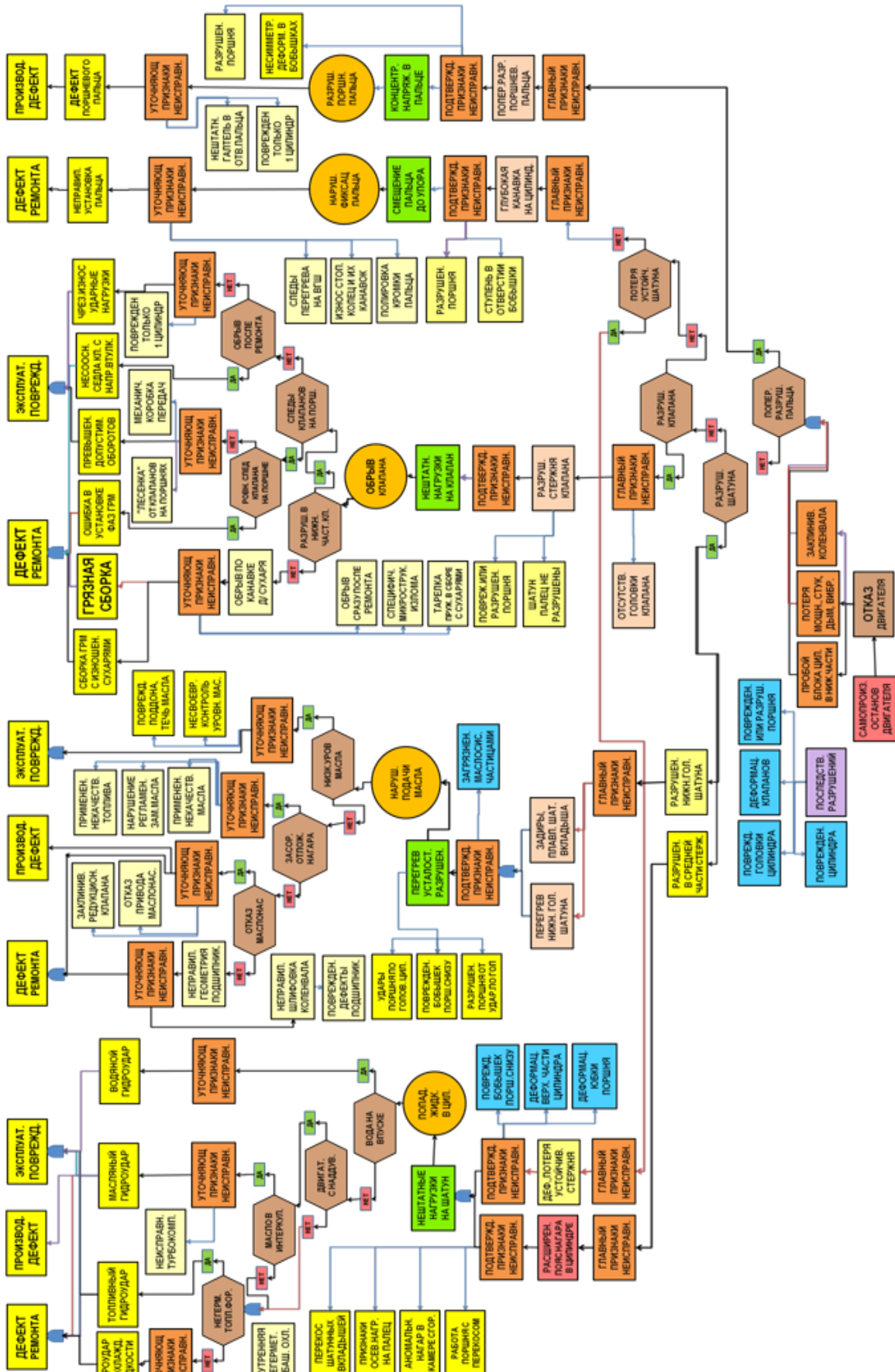


Рис. 8. Общий вид дерева отказов, вызывающих тяжелые повреждения двигателя, описанные в [16]

Хорошо видно, что полученный граф по структуре заметно отличается от аналогичного, построенного для отдельного агрегата двигателя (см. рис. 3), что объясняется упомянутым выше отличием ДВС от турбокомпрессора, где вследствие высокой скорости вращения ротора отказы, как правило, дают более общий характер повреждений. Структура логического графа для двигателя, наоборот, фактически представляет собой дерево с расходящимися почти независимыми ветвями. Это связано с отмеченным выше локальным характером отказов, когда повреждение локализуется, к примеру, в поврежденном цилиндре и не распространяется на большинство деталей двигателя.

Тем не менее, полученный результат в виде логического графа (рис. 8) уточняет и детализирует данные [16] о причинах, признаках и последствиях тяжелых повреждений, связанных, главным образом, с нарушением синхронизации поступательно движущихся и вращающихся деталей

Таким образом, для определения причины отказа в случае тяжелых повреждений можно вместо таблицы использовать заданный графом алгоритм логического поиска путем перемещения по графу от события отказа вверх в сторону причин отказа.

Более того, проверка на реальных случаях отказов [16] показала, что кажущаяся громоздкость графа не является препятствием для его практического использования – логика, построенная на структурировании признаков неисправности, легко выводит на искомую группу причин, после чего требуется только выделить уточняющие признаки, чтобы точно выйти на действительную причину отказа.

Заключение

По результатам проведенного исследования установлено, что несмотря на успехи в разработке методик диагностики технического состояния поршневых ДВС, их использование для поиска причин отказов фактически неэффективно. Установлено, что применяемые для оценки характеристик надежности и рисков отказов технических систем логико-вероятностные модели, описывающие причинно-следственные связи отказов всей системы с отказами отдельных элементов и другими событиями (воздействиями), в том числе, метод анализа дерева отказов, не соответствуют задачам поиска причин неисправностей. Отсутствие необходимых методик приводит к неправильному определению причины, повторению отказов и неоправданно высоким затратам в эксплуатации на повторные ремонты.

Выполненное исследование показало, что определение причин отказов поршневых ДВС может

быть сделано на основе модифицированного обратного дерева отказов, позволяющего выполнять логический анализ в обратном по отношению к общепринятому при составлении дерева отказов направлении – от события отказа всей системы к базисным событиям, инициирующим отказ в отдельных ее элементах. В результате определение причины отказа может быть сделано логическим путем с достаточной для практики достоверностью при минимальных затратах времени, что, по крайней мере, позволяет исключить грубые ошибки при расследовании причин отказа.

Дальнейшие исследования в разработке методик определения причин неисправностей логическими методами могут быть направлены на отработку структуры логических графов для охвата более широкого спектра возможных неисправностей и отказов.

Литература

1. Van Basshuysen, R. *Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives [Text]* / R. Van Basshuysen, F. Schäfer. – Warrendale : SAE International, 2004. – 812 p.
2. Greuter, E. *Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes [Text]* / E. Greuter, S. Zima. – Warrendale : SAE International, 2012. – 582 p.
3. Хрулев, А. Э. *Ремонт двигателей зарубежных автомобилей [Текст]* / А. Э. Хрулев. – М. : Изд-во "За Рулем", 1998. – 440 с.
4. Хрулев, А. Э. *Экспертиза технического состояния и причины неисправностей автомобильной техники [Текст]* / А. Э. Хрулев, В. Б. Дроздовский, С. К. Лосавио. – М. : Издательство АБС, 2019. – 966 с.
5. Мигаль, В. Д. *Техническая диагностика автомобильных двигателей. Т.2. Неисправности, параметры и средства диагностики [Текст]* / В. Д. Мигаль. – Харьков : Майдан, 2014. – 403 с.
6. *Компоненты двигателя и фильтры: дефекты, их причины и профилактика [Электронный ресурс]* / Mahle GmbH, 2010. – 75 с. – Режим доступа: URL: www.mahle-aftermarket.com. – 20.07.2020.
7. *Повреждения поршней – как выявить и устранить их [Текст]* : пер. с нем. – MSI Motor Service International GmbH, Neckarsulm, Германия, 2004. – 103 с.
8. Мигаль, В. Д. *Техническая диагностика автомобильных двигателей. Т.3. Практические основы диагностирования [Текст]* / В. Д. Мигаль. – Харьков : Майдан, 2014. – 444 с.
9. Maurya, R. K. *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics. In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Mechanical Engineering Series [Text]* / R. K. Maurya. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2019. – 616 p.

10. Isermann, R. *Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components [Text]* / R. Isermann. – Berlin : Springer-Verlag GmbH, 2017. – 303 p.

11. Шубин, Р. А. *Надёжность технических систем и техногенный риск [Текст]* / Р. А. Шубин. – Тамбов : Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.

12. *Aircraft Reciprocating-Engine Failure. An Analysis of Failure in a Complex Engineered System. ATSB Transport Safety Investigation Report. Aviation Safety Research and Analysis Report B2007/0191 [Text]*. – Canberra City : Australian Transport Safety Bureau, 2007. – 255 p.

13. Laskowski, R. *Fault Tree Analysis as a tool for modeling the marine main engine reliability structure [Text]* / R. Laskowski // *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. – 2015. – T. 41, No. 113. – P. 71-77.

14. Хрулев, А. Э. *Использование логико-вероятностных методов для определения причин отказов турбокомпрессоров в эксплуатации ДВС [Текст]* / А. Э. Хрулев // *Автомобиль и электроника. Сучасні технології*. – 2019. – № 16. – С. 5-18. DOI: 10.30977/VEIT.2019.16.0.5.

15. Miller, J. *Turbocharger Failure Analysis: What Went Wrong and How to Fix It [Электронный ресурс]* / J. Miller. – MUSCLE CAR DIY, 2015. – Режим доступа: <https://www.muscledcardiy.com/performance/turbocharger-failure-analysis-went-wrong-fix/>. – 20.07.2020.

16. Хрулев, А. Э. *Методика определения причины неисправности ДВС при тяжелых эксплуатационных повреждениях [Текст]* / А. Э. Хрулев, Ю. В. Кочуренко // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2017. – №1. – С. 52-60. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.10.

17. Хрулев, А. Э. *Моделирование повреждения шатуна при поступлении жидкости в цилиндр ДВС [Текст]* / А. Э. Хрулев, Ю. В. Кочуренко // *Автомобиль и электроника. Сучасні технології*. – 2020. – № 17. – С. 5-18. DOI: 10.30977/VEIT.2226-9266.2020.17.0.5.

18. Хрулев, А. Э. *Влияние неисправностей в системе смазки на характер повреждения подшипников ДВС [Текст]* / А. Э. Хрулев, М. В. Кротов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2018. – № 1. – С. 74-81. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.13.

19. Хрулев, А. *Дьявол в деталях. Ч.1 [Текст]* / А. Хрулев, С. Самохин // *АБС-авто*, 2012. – № 01. – С. 22-25.

References

1. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. *Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives*. Warrendale, SAE International, 2004. 812 p.

2. Greuter, E., Zima, S. *Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes*. Warrendale, SAE International, 2012. 582 p.

3. Khrulev, A. E. *Remont dvigatelei zarubezhnykh avtomobilei [Foreign car engine repair]*. Moscow, "Za Rulem" Publ., 1998. 440 p. (In Russian).

4. Khrulev, A. E., Drozdovskiy, V. B., Losavio, S. K. *Expertiza tekhnicheskogo sostoyaniya i prichiny neispravnostei avtomobilnoi tehniki [Technical condition expertise and fault causes of vehicle]*. Moscow, ABS Publ., 2019. 966 p. (In Russian).

5. Migal, V. D. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomobilnykh dvigatelei. T.2. Neispravnosti, parametry i sredstva diagnostiki [Technical diagnostics of automobile engines. V.2. Faults, parameters and diagnostic tools]*. Kharkov, Maidan, 2014. 403 p. (In Russian).

6. *Engine components and filters: defects, their causes and prevention. Technical information*. Mahle GmbH, 2015. 75 p. Available at: www.mahle-aftermarket.com (accessed 20.07.2020).

7. *Piston damage – Recognizing and rectifying*. Neckarsulm, MSI Motor Service International GmbH, 2014. 103 p.

8. Migal, V. D. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomobilnykh dvigatelei. T.3. Prakticheskie osnovy diagnostirovaniya [Technical diagnostics of automobile engines. V.3. Practical Diagnostic Basics]*. Kharkov, Maidan, 2014. 444 p. (In Russian).

9. Maurya, R. K. *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics. In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Mechanical Engineering Series*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2019. 616 p.

10. Isermann, R. *Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components*. Berlin, Springer-Verlag GmbH, 2017. 303 p.

11. Shubin, R. A. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk [Reliability of technical systems and technological risk]*. Tambov, Publ. FGBOU VPO "TGTU", 2012. 80 p. (In Russian).

12. *Aircraft Reciprocating-Engine Failure. An Analysis of Failure in a Complex Engineered System, ATSB Transport Safety Investigation Report, Aviation Safety Research and Analysis Report B2007/0191*. Canberra City, Australian Transport Safety Bureau, 2007. 255 p.

13. Laskowski, R. *Fault Tree Analysis as a tool for modeling the marine main engine reliability structure. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 2015, vol. 41, no. 113, pp.71-77.

14. Khrulev, A.E. *Ispolzovanie logiko-veroyatnostnykh metodov dlya opredeleniya prichin otkazov turbokompressorov v expluatatzii DVS [Applying logical and probabilistic methods to determine the causes of failure of turbochargers in the internal combustion engines operation]*. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 2019, no. 16, pp. 5-18. DOI: 10.30977/VEIT.2019.16.0.5. (In Russian).

15. Miller J. *Turbocharger Failure Analysis: What Went Wrong and How to Fix It*. MUSCLE CAR DIY, 2015. Available at: <https://www.muscledcardiy.com/performance/turbocharger-failure-analysis-went-wrong-fix/> (accessed 20.07.2020).

16. Khrulev, A. E., Kochurenko, Yu. V. Metodika opredeleniya prichiny neispravnosti DVS pri tyazhelykh expluatatsionnykh povrejdeniyakh [Method for determining the cause of ICE failure for severe damages in operation]. *Internal Combustion Engines*, 2017, No.1, pp. 52-60. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.10. (In Russian).

17. Khrulev, A. E. Modelirovanie povrejdeniya shatuna pri postuplenii zhidkosti v cilindr DVS [Simulation of connecting rod damage when fluid enters the internal combustion engine cylinder]. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 2020, no.17, pp. 5-18.

DOI: 10.30977/VEIT.2226-9266.2020.17.0.5. (In Russian).

18. Khrulev, A. E., Krotov, M. V. Vliyanie neispravnostei v sisteme smazki na kharakter povrejdeniya podshipnikov DVS [Influence of the lubrication system faults on the nature of internal combustion engine bearing damage]. *Internal Combustion Engines*, 2018, no.1, pp. 74-81. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.13. (In Russian).

19. Khrulev, A., Samokhin, S. Diavol v detalyakh, Ch.1 [Devil in details, P.1]. *ABS-auto*, 2012, no. 1, pp. 22-25. (In Russian).

Поступила в редакцію 30.07.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ПОШУКУ ПРИЧИН ВІДМОВ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Е. Хрулев, В. Г. Клименко

Всупереч успіхам в дослідженнях і розробці конструкцій сучасних поршневих двигунів внутрішнього згорання для транспортних засобів різного призначення, включаючи авіацію, до теперішнього часу не створено надійних методик для визначення причин їх несправностей та відмов, а застосування на практиці відомих методик, в тому числі, діагностики технічного стану двигунів, не тільки вимагає велику трудомісткість і високої кваліфікації персоналу, але в багатьох випадках фактично неефективно. Особливо це стосується важких експлуатаційних ушкоджень, які виникають при руйнуванні деталей і супроводжуються порушенням синхронізації їх зворотного-поступального та обертального руху. З іншого боку, виконане дослідження показує, що причини несправностей та відмов двигунів можуть визначитися і за допомогою логіко-імовірнісних методів, із залученням наявного досвіду дослідження різних несправностей. Однак, використовувати відомі моделі та методики, побудовані на базі аналізу дерева відмов, в задачах пошуку причин відмов не завжди можливо, оскільки такі методики розроблені для задач розрахунку характеристик надійності розроблюваних двигунів, а не пошуку причин їх відмов в експлуатації. Вирішення зазначеного завдання було знайдено в кілька етапів. Спочатку шляхом структурування ознак було складено дерево відмов, яке логічно описує причинно-наслідкові зв'язки між подією відмови та початковим пошкодженням, окремо по кожному з обраних для аналізу видів відмов, пов'язаних з важкими ушкодженнями досліджуваного типу двигунів. Далі для кінцевого числа обраних видів відмов було розроблено модифіковане (перевернуте) дерево відмов, що дозволяє виконувати простий логічний аналіз у зворотному щодо загальноприйнятого напрямку — від події відмови системи до базисних подій, який ініціює відмову. Після цього було складено загальне для розглянутих видів відмов модифіковане дерево відмов. В результаті використання запропонованої методики на практиці стало можливим визначити причини відмови поршневих двигунів внутрішнього згорання з достатньою вірогідністю при мінімальних витратах часу.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання; несправність; відмова; логічний метод; аналіз дерева відмов.

FEATURES OF COMPOSING AND APPLICATION OF LOGICAL METHODS FOR SEARCHING OF FAILURE CAUSES OF INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINES IN OPERATION

A. Khrulev, V. Klimenko

Despite the successes in research and development of designs of modern internal combustion engines for various purpose vehicles, including aircraft, to date, no reliable methods have been created to determine the causes of their failures. The application of well-known methods in practice, including the diagnosis of engine technical condition, not only requires a lot of labor and highly qualified personnel but in many cases, it is practically ineffective. This is especially true for severe operational damage arising from the destruction of the parts and accompanied by disturbing the synchronization of their reciprocating and rotational motion. On the other hand, the performed research shows that the causes of ICE failures can also be determined by logical-probabilistic methods, including based on the fault tree analysis, drawing on the available experience of studying various engine faults. However, it is not possible to use the well-known models and methods built based on the failure tree analysis in problems of find-

ing the causes of engine failure. The reason is since such methods have been developed for the tasks of calculating the reliability characteristics of developed engines, rather than finding the causes of their failure in operation. The solution to this problem was found in several stages. Initially, by structuring the symptoms, a fault tree was compiled that logically describes the cause-effect relationships between the failure event and the initial damage that caused it. This is done separately for each of the types of failures selected for analysis and associated with severe damage to the studying engine type. Further, for a finite number of selected types of failures, a modified (inverted) fault tree was developed. It allows you to perform a simple logical analysis in the opposite direction to the generally accepted direction - from the system failure event to the basic events initiating the failure. After that, a modified engine fault tree common to the considered types of failures was compiled. As a result of using the proposed methodology in practice, it became possible to determine the causes of engine failure with sufficient reliability with minimal time.

Keywords: internal combustion engine; fault; failure; logical method; fault tree analysis.

Хрулев Олександр Едуардович – канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, керівник Міжнародного моторного бюро, Немішаєве, Київська обл., Україна.

Клименко Валентин Григорович – асистент кафедри СЕУ і ТЕ, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

Alexander Khrulev – PhD, Senior Researcher, Head of the International Motor Bureau, Nemeshaevo, Kiev region, Ukraine,

e-mail: alo.engine@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6841-9225,
<https://scholar.google.com.ua/citations?user=QIEJeQgAAAAJ&hl=ru>.

Valentin Klimenko – Assistant of the Department of SPP and TO, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

e-mail: alo.engine@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6730-0380.