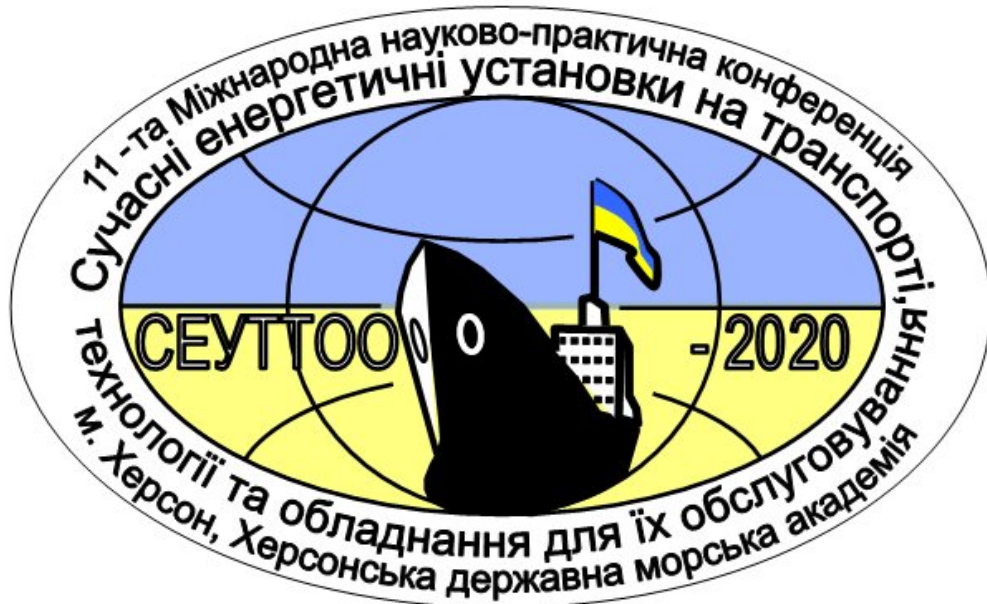


Міністерство освіти і науки України
Херсонська державна морська академія
Херсонський національний технічний університет
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»
Національний транспортний університет
Одеський національний морський університет
Національний університет «Одеська морська академія»
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова
Інститут газу НАН України
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Білоруський національний технічний університет
Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі
Національний технічний університет «ХПІ»
University of Zilina (Словаччина)
Akademia Morska w Szczecinie (Польща)
Крюінгова компанія «Marlow Navigation»

МАТЕРІАЛИ

11-ї Міжнародної науково-практичної конференції
**СУЧАСНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА
ТРАНСПОРТІ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ
ОБСЛУГОВУВАННЯ**
СЕУТТОО-2020



Херсон – 2020

Науковий комітет:

Білоусов Є.В. – к.т.н., доц., ХДМА;
Варбанець Р.А. – д.т.н., проф., ОНМУ;
Волков В.П. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Волошин В.С. – д.т.н., професор, ПДТУ;
Горбов В.М. – к.т.н., проф., НУК;
Грицук І.В. – д.т.н., проф., ХДМА;
Гутаревич Ю.Ф. – д.т.н., проф., НТУ;
Іщенко І.М. – к.т.н., проф., ХДМА;
Каграманян А.О. – к.т.н., доц., УДУЗТ;
Клец Д.М. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Колегаєв М.О. – к.т.н., проф., НУОМА;
Кухаренок Г.М. – д.т.н., проф., БНТУ;
Матейчик В.П. – д.т.н., проф., НТУ;
Монастирський Ю.А. – д.т.н., проф., КНУ;
Наглюк І.С. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Подригало М.А. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Поливянчук А.П. – д.т.н., проф., ХНУ
міського господарства імені О.М.
Бекетова;
Рева О.М. – д.т.н., проф., НАУ;
Рожков С.О. – д.т.н., проф., ХДМА;
Саравас В.Є. – к.т.н., доцент, ПДТУ;
Сараєв О.В. – д.т.н., проф., ХНАДУ;

Сахно В.П. – д.т.н., проф., НТУ;
Симоненко Р.В. – к.т.н., доц., ДП
«ДержавтотрансНДІпроект»;
Тамаргазін О.А. – д.т.н., проф., НАУ;
Тимошевський Б.Г. – д.т.н., проф., НУК;
Ткач М.Р. – д.т.н., проф., НУК;
Тулученко Г.Я. – д.т.н., проф., ХНТУ;
Шарко О.В. – д.т.н., проф., ХДМА;
Шостак В.П. – к.т.н., проф., НУК
Gerlici Juraj – Dr., prof., University of Zilina
(Словаччина);
Kuric Ivan – Dr., Ing. prof., University of
Zilina (Словаччина);
Podprygora Olena – директор науково-
виробничої компанії «Modern Multi Power
Systems» s.r.o. (Чехія);
Saga Milan – Dr., Ing. prof., University of
Zilina (Словаччина);
Smieszek Mirosław – д.т.н., проф., Rzeszow
University of Technology (Польща);
Wróblewski Aleksander – д.т.н., проф.,
University of Warmia and Mazury in
Olsztyn (Польща)

Організаційний комітет:

Голова – Василь ЧЕРНЯВСЬКИЙ, ректор ХДМА
Заступники голови – Андрій БЕНЬ, проректор з НПР ХДМА
Олександр АКИМОВ, в.о. декана факультету суднової енергетики.
Володимир САВЧУК, зав. кафедри експлуатації суднових енергетичних установок.
Вчений секретар конференції – Дмитро ЗІНЧЕНКО, доцент кафедри експлуатації
суднових енергетичних установок.
Технічний секретар – Дар'я КУРНОСЕНКО, завідувач лабораторії кафедри
експлуатації суднових енергетичних установок.

Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 11-а Міжнародна науково-практична конференція, 08-10 вересня 2020 р.
– Херсон: Херсонська державна морська академія.

У програмі 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» представлені доповіді, які присвячені проблемам експлуатації, виробництва та проектування енергетичних установок та устаткування на транспорті, а також підготовці спеціалістів у сфері транспортної енергетики й устаткування.

ЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДВС И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ ПОСТРОЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Дмитриев С.А., Хрулев А.Э.

Национальный авиационный университет, Украина

Несмотря на успехи в исследованиях и разработке конструкций двигателей внутреннего сгорания, к настоящему времени не создано надежных методик для определения причин их отказов, а применение на практике известных методик, в том числе, диагностики технического состояния ДВС, не только требует большой трудоемкости и высокой квалификации персонала, но во многих случаях фактически неэффективно. Использовать известные модели и методики, построенные на базе анализа дерева отказов, в задачах поиска причин отказов ДВС также не удастся, поскольку такие методики разработаны для задач расчета характеристик надежности, а не поиска причин отказов.

Актуальность темы.

Большие усилия и средства, длительное время вкладывавшиеся в научные исследования, проектно-конструкторские работы и производство ДВС, значительно повысили их долговечность и надежность в эксплуатации [1]. Однако даже при техническом совершенстве новых конструкций и производственных технологий, в современных ДВС возможно возникновение неисправностей и отказов, для эффективного устранения которых требуется правильное определение их причин [2].

Именно с проблемой правильного определения причин неисправностей и отказов в эксплуатации вынуждены сталкиваться эксплуатанты транспортных средств и ремонтные организации [3, 4]. При этом одним из факторов, препятствующих 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 и отказов ДВС в эксплуатации.

Анализ состояния проблемы. Анализ опубликованных источников показывает, что известные на сегодня способы и методики определения причин неисправностей и отказов ДВС 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 [5], что, на первый взгляд, должно помочь потребителю выполнить поиск причины неисправности (troubleshooting). Однако использование таких таблиц на практике вследствие многозначности указания причины неисправности требует настолько большой трудоемкости, что фактически неэффективно, в результате чего потребители в эксплуатации, как правило, затрудняются определить по такой методике причину возникшей 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 – для того, чтобы найти причину неисправности, в общем случае требуется выполнить десятки проверок различных версий.

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. 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.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка логической методики для определения причин неисправностей ДВС в эксплуатации, применимой не только специалистами экспертного уровня, но и средней квалификации.

Методика исследования. 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 наддува ДВС – турбокомпрессор, на котором была апробирована предлагаемая методика, с целью дальнейшего распространения ее применения на весь двигатель в целом.

Для решения задачи был применен метод анализа дерева отказов, ранее применявшийся при исследовании неисправностей различных технических систем, включая ДВС, в том числе, для расчета параметров надежности [10, 11]. Однако с целью определения причин неисправностей ДВС данный метод применен впервые. 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).

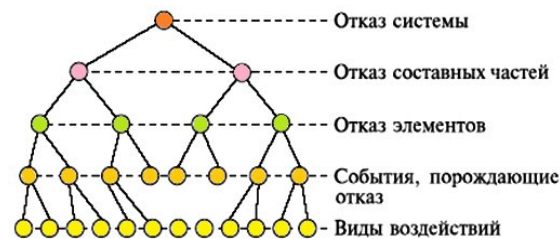


Рисунок 1. Дерево отказов: возможные воздействия на систему вызывают повреждения (базовые события, порождающие отказ), что приводит к отказу элементов (деталей), затем составных частей (узлов) и всей системы в целом

Дерево отказов определяет причинно-следственные связи отказа всей системы с отказами ее подсистем и отдельных элементов, а также другими событиями и воздействиями. 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 [12].

Составление дерева отказов рассматриваемого агрегата ДВС было выполнено в несколько последовательных приближений [13]:

- 1) структурирование объекта исследования путем разбиения его на отдельные узлы и объединение их в блок-схему,
- 2) определение возможных источников, причин и признаков неисправностей для данного объекта в целом,
- 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 рассматриваемые 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 – 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 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.2). Тогда при наличии всех признаков отказа нетрудно определить его причину, просто следуя логической цепи графа.

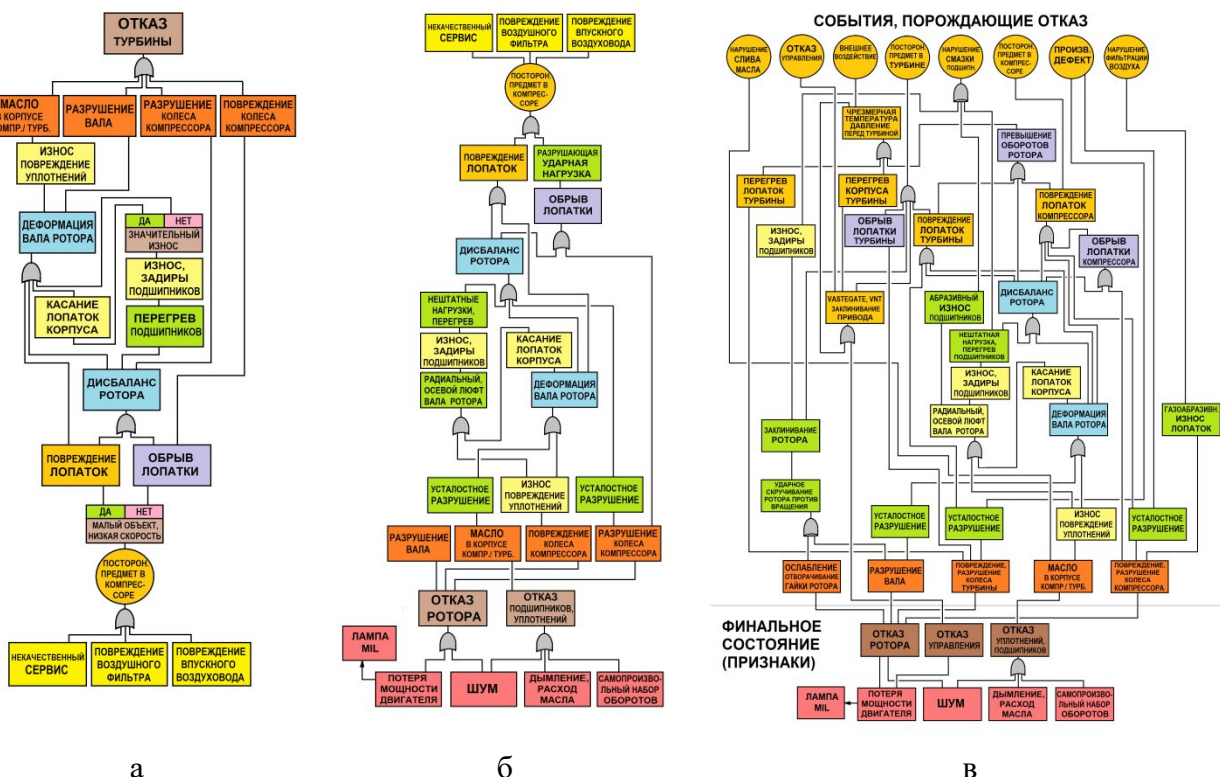


Рисунок 2. Общий вид логических графов [13]: пример модифицированного (а) и перевернутого (б) дерева одного отказа (попадание постороннего предмета в турбокомпрессор) как составной части модифицированного перевернутого дерева отказов всего агрегата (в)

Однако непосредственно перенести и распространить полученные в [13] 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 чрезвычайно 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].

Как показывает практика [1, 4], в ДВС нет такой глобальной взаимосвязи между узлами и деталями. Наоборот, в эксплуатации ДВС отказы чаще вызваны локальными повреждениями отдельных сопряженных деталей, 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.

Результаты исследования. 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 [10, 11]. Однако если решается задача поиска причины отказа, то она формулируется не как поиск формулы для расчета вероятности отказа (для любого выпускаемого двигателя такие исследования должны быть уже проведены разработчиком), а как определение причины отказа, который уже случился.

Кроме того, при разработке логического графа дерева отказов ДВС 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, в том числе [15]:

- 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.

Для составления дерева отказов такого сложного объекта как ДВС наиболее важным представляется разбиение (структурирование) признаков на следующие группы [15] – главные, подтверждающие (главный) и уточняющие (вид и место повреждающего воздействия). В соответствии с этим для каждого из выделенных отказов можно представить общую логическую схему прямого анализа в направлении от причины к событию отказа двигателя в виде простого структурного графа (рис. 3).



Рисунок 3. Прямая логическая схема (направление анализа – снизу-вверх), в общем виде описывающая данные по отдельно выделенной неисправности (отказу)

Основываясь на такой логической схеме, нетрудно составить детализированный граф по каждому отказу из числа рассматриваемых. 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 переворачивается (реверсируется) с целью получения логической схемы для анализа в обратном направлении – от события отказа в сторону его причины, что соответствует задаче поиска причины уже возникшего отказа (в отличие от прямых задач определения вероятности отказа).

Указанным способом могут быть разработаны логические схемы дерева отказов для всех рассматриваемых причин [13] – разрушения шатуна после гидроудара в одном из цилиндров ДВС от попадания воды, масла, топлива или охлаждающей жидкости, разрушения подпальника и шатуна из-за нарушения смазки подпальников, разрушения клапана и поршневого пальца, а также нарушения осевой фиксации пальца.

Составив дерево отказов отдельно по всем рассматриваемым видам отказов, можно свести их всех в одну логическую схему. Результат представлен на рис.4, где один логический граф объединяет основные виды отказов ДВС, которые приводят к тяжелым повреждениям, уточняет и детализирует данные о причинах, признаках и последствиях таких повреждений ДВС, связанных, главным образом, с нарушением синхронизации возвратно-поступательно движущихся и вращающихся деталей.

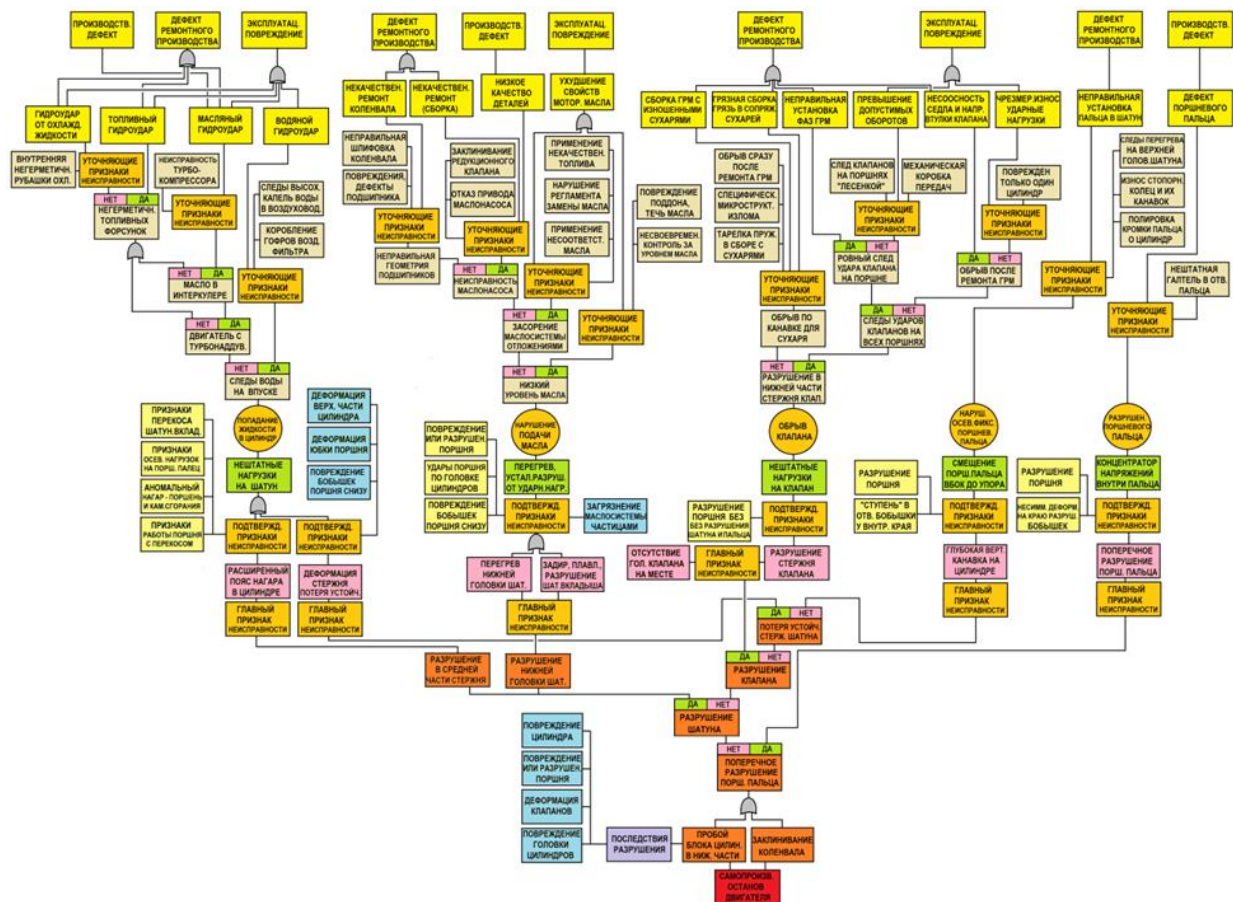


Рисунок 4. Общий вид дерева отказов ДВС, вызывающих тяжелые повреждения

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

Хорошо видно, что полученный граф по структуре заметно отличается от аналогичного, построенного для отдельного агрегата ДВС (рис.2), что объясняется упомянутым выше отличием локального характера отказов в ДВС от турбокомпрессора, где вследствие высокой скорости вращения ротора отказы, как правило, имеют более общий характер. Тем не менее, проверка на реальных случаях отказов 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 правильно выделить уточняющие признаки, чтобы точно выйти на действительную причину отказа.

Выводы. Несмотря на успехи в разработке методик диагностики технического состояния ДВС, к настоящему времени их использование для поиска причин отказов фактически неэффективно. Вместе с тем, 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 ДВС. Во многих случаях это приводит к неправильному определению причины, повторению отказов и неоправданно высоким затратам в эксплуатации

Выполненное исследование показывает, что определение причины отказов ДВС может быть выполнено на основе анализа 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 с достаточной для практики достоверностью при минимальных затратах времени, что позволяет исключить грубые ошибки при расследовании причин неисправности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Basshuysen R. Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives. SAE International, Warrendale, 2004. 812 p.
2. Greuter E. Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. SAE International, Warrendale, USA, 2012. 582 p.
3. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей. М.: Изд-во "За Рулем", 1998. 440 с.
4. Хрулев А.Э., Дроздовский В.Б., Лосавио С.К. Экспертиза технического состояния и причины неисправностей автомобильной техники. М.: Издательство АБС, 2019. 966 с.
5. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей. Т.2. Неисправности, параметры и средства диагностики. Харьков: Майдан, 2014. 403 с.
6. Компоненты двигателя и фильтры: дефекты, их причины и профилактика. Mahle GmbH, 2010, веб-ресурс. URL: www.mahle-aftermarket.com.
7. Повреждения поршней – как выявить и устранить их. Пер. с нем. MSI Motor Service International GmbH, Neckarsulm, Германия, 2004. 103 с.
8. Maurya R.K. Reciprocating Engine Combustion Diagnostics. In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Mechanical Engineering Series. Springer Nature Switzerland, Cham, 2019. 616 p.
9. Isermann R. Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 303 p.

10. 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. Australian Transport Safety Bureau, Canberra City, 2007. 255 p.
11. 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, no.41 (113), pp.71-77.
12. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск. Тамбов, Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.
13. Хрулев А.Э. Использование логико-вероятностных методов для определения причин отказов турбокомпрессоров в эксплуатации ДВС. Автомобиль и электроника. Сучасні технології, №16, 2019. С. 5-18. DOI: 10.30977/VEIT.2019.16.0.5.
14. Miller J. Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems (S-A Design) Paperback, CarTech, 2008. 160 p.
15. Хрулев А.Э., Кочуренко Ю.В. Методика определения причины неисправности ДВС при тяжелых эксплуатационных повреждениях. Двигатели внутреннего сгорания, 2017, №1. с. 52-60. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.1.10.