

Александр Хрулев, Валентин Клименко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ОТКАЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ



= ?

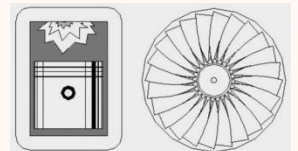


Международное моторное бюро



Одесский национальный морской университет

XXV Международный конгресс
Двигателестроителей
8-13 сентября 2020 г.



Основные неисправности ДВС: общая характеристика проблемы



Особенности задачи определения причин неисправностей

1. За время развития ДВС значительные усилия были направлены на исследование и разработки новых конструкций.
2. Такие конструкции были созданы, однако они не являются на 100% надежными, в них в зависимости от различных условий возникают неисправности и отказы.
3. За это время не были созданы методики, позволяющие надежно находить причину неисправности.
4. Фактически обязанность определения причин неисправностей производители отдали потребителям.



Трудности, возникающие при решении задачи:

- тесная взаимосвязь процессов внутри двигателя,
- недостаточное количество данных,
- недостаточный опыт исследователя, непонимание им сути процессов,
- ошибочное объяснение причинно-следственных связей,
- отсутствие готовых методик,
- прочие субъективные факторы.



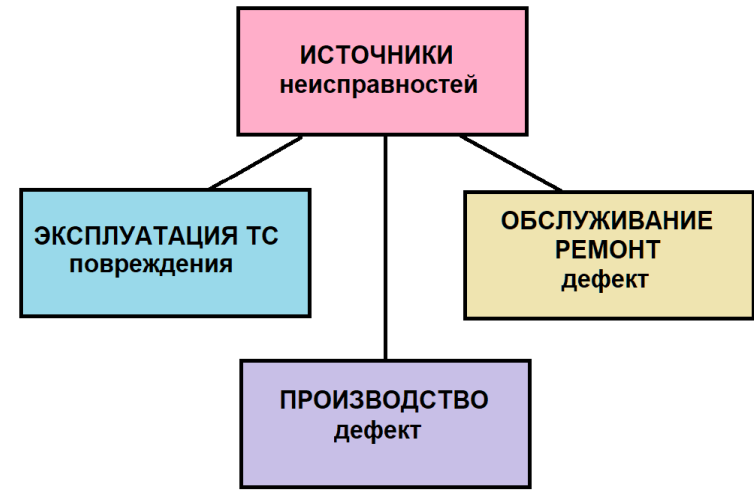
Источники неисправностей

1. Производственные неисправности

а) **первичного производства** (качество материалов, мех.обработки и сборки, включая дефекты электронной системы управления)

б) **вторичного производства:**

- ❖ - ремонта в целом (то же, что и для первичного)
- ❖ - специфика (не устранена причина выхода из строя)
- ❖ - обслуживания ДВС (некачественное масло, несвоевременное и неграмотное обслуживание)



2. Эксплуатационные неисправности

- ☐ - нарушение подачи масла
- ☐ - грязное масло
- ☐ - несоответствующее масло (особенно, при очень низких и очень высоких температурах)
- ☐ - плохая фильтрация воздуха
- ☐ - разрушение деталей
- ☐ - нормальный износ
- ☐ - механические повреждения
- ☐ - неисправности в системе управления (блоки управления, датчики, разъемы, кабели)



Методы определения причин неисправностей

3 группы способов и методик определения причин неисправностей и отказов поршневых ДВС в эксплуатации:

- 1) таблицы неисправностей
- 2) справочники неисправностей
- 3) методики диагностики технического состояния

Таблицы неисправностей - основные симптомы неисправной работы, соответствующие им причины и способы устранения

- некоторым неисправностям могут соответствовать десятки причин,
- чрезвычайно большая трудоемкость практического использования таблицы.



Possible Cause

Trouble and Symptoms

	Lacks Power	Black Smoke	Excessive Oil Consumption	Blue Smoke	Noise	Excessive Oil - Compressor	Excessive Oil - Turbine	Drag or Bind in Rotor Assy	Excess Rotor play	Damaged Comp. Wheel	Damaged Turb. Wheel
Dirty Air Cleaner Element	•	•		•	•	•					
Plugged Crankcase Breathers			•				•				
Air Cleaner Element Missing or loose to Turbo				•	•	•		•		•	
Collapsed or restricted air pipe to Turbo	•	•		•	•	•					
Restricted or Damaged Boost Tube	•	•		•	•	•					
Foreign Object Between Air Cleaner & Turbo	•	•		•	•	•		•	•	•	
Foreign Object in Exh. Sys. From Engine	•	•		•	•	•		•	•	•	•
Turbocharger Flanges, Clamps, or Bolts Loose	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Inlet Manifold Cracked, Loose Gaskets/Hoses	•	•		•	•	•					
Exh. Manifold Cracked, Burned/Blown Gasket	•	•		•	•	•					
Restricted Exhaust System				•							
Oil Lag at Start-up								•	•		
Insufficient Lubrication								•	•		
Contaminated Lube Oil								•	•		
Improper Type Lubricating Oil Used								•	•		
Restricted Oil Feed Line						•	•	•	•		
Restricted Oil Drain Line			•				•				
Turbine Housing Damaged or Restricted	•	•		•		•					•
Turbocharger Seal Leakage			•	•		•	•				
Worn Journal Bearing	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•
Excess Dirt build-up on Comp. Housing	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Excess Carbon Build-up behind Turb. Wheel	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Too Fast Acceleration at Initial Start-up, Oil Lag									•	•	
Too Little Warm-up Time									•	•	
Fuel Pump Malfunction	•	•									
Worn or Damaged Injectors	•	•									
Valve Timing	•	•									
Burned Valves	•	•									
Worn Piston Rings	•	•									
Burned Piston(s)	•	•									
Leaking Oil Feed Line								•	•		
Excessive Engine Pre-Oil				•			•				
Excessive Engine Idle				•			•				
Coked or Sludged Center Housing			•	•			•	•			•
Oil Pump Malfunction									•	•	•
Oil Filter Plugged			•	•		•	•	•	•	•	•
Oil Bath Air Cleaner: Inlet screen restricted	•	•	•	•	•						
Oil Bath Air Cleaner: Oil Pull /Viscosity Low	•	•	•	•	•						
Boost Control Malfunction: Wastegate	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•
Boost Control Malfunction: VNT	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•
Boost Control Malfunc: Eng. Mgmt. System	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•

Методы определения причин неисправностей

3.4.2 Прогары на головке и юбке поршня (двигатель с принудительным воспламенением смеси)



Описание повреждения

- На головке поршня имеется прогар за поршневыми кольцами.
- Юбка поршня не имеет задиrow, лишь со стороны повреждения на юбку поршня попал материал поршня.



Рис. 1

Оценка повреждения

Прогары в головке поршней двигателей с принудительным воспламенением смеси являются последствием калильного зажигания на поршнях с преимущественно ровным днищем и большими поверхностями сжатия. Калильное зажигание вызывается раскаленными деталями в камере сгорания, если их температура

превышает температуру самовоспламенения газовой смеси. Это в основном свеча зажигания, выпускные клапаны и отложения масляного нагара на стенках камеры сгорания. В результате калильного зажигания головка поршня сильно нагревается в области поверхности сжатия. Из-за

высокой температуры материал поршня становится мягким, и под действием силы инерции и проникающих в место повреждения отработавших газов происходит сьем материала до масляеменного поршневого кольца.

Возможные причины

- Свечи зажигания с недостаточным калильным числом.
- Слишком бедная смесь и в результате этого повышенная температура сгорания.
- Поврежденные клапаны или слишком малый зазор в клапанном приводе, поэтому клапаны неправильно закрываются. От протекающих горячих отработавших газов клапаны начинают раскаляться. В первую очередь это касается выпускных клапанов, потому что впускные клапаны охлаждаются свежими газами.
- Раскаленные остаточные продукты сгорания на днищах поршней, головке блока цилиндров, клапанах и свечах зажигания.
- Неподходящее топливо со слишком низким октановым числом. Качество топлива должно соответствовать степени сжатия двигателя, т.е. октановое число топлива должно обеспечивать требуемую детонационную стойкость для двигателя во всех рабочих состояниях.
- Дизельное топливо в бензине и в результате этого понижение октанового числа топлива.
- Высокая температура двигателя или всасываемого воздуха из-за недостаточной вентиляции моторного отсека.
- Общий перегрев двигателя.

Специализированные справочники повреждений:

- 1 - список возможных причин и признаков неисправности
- 2 - эталоны для сравнения с реальными объектами

Особенности, трудности применения

- нет производственных дефектов
- в некоторых случаях сложно понять, какое повреждение
- первично, а какое вторично
- многозначность – указано много возможных причин.

Следствие

- 1 - справочники не являются универсальным средством
- 2 - с помощью справочников невозможно доказать производственный дефект



Методы определения причин неисправностей

Диагностические методы:

- ☐ давно и хорошо научно разработанные,
- ☐ на базе измерения параметров и их соответствующей математической обработки
- ☐ используются в качестве базовых алгоритмов в ряде диагностических приборов (например, в мотор-тестерах, сканерах и т.д.)
- ☐ помогают обнаружить различные отклонения в работе двигателя и даже найти причины отдельных неисправностей

Особенности, трудности применения

- применение ограничено необходимостью иметь специальные знания и серьезную подготовку
- высокая стоимость диагностического оборудования.
- многие виды повреждений и отказов в механической части двигателей, как правило, плохо диагностируются,
- причины отказов вообще не выявляются диагностическими методами.



Следствие

- помогают устанавливать факт неисправности и неисправный узел, но не являются средством для определения причин их неисправностей



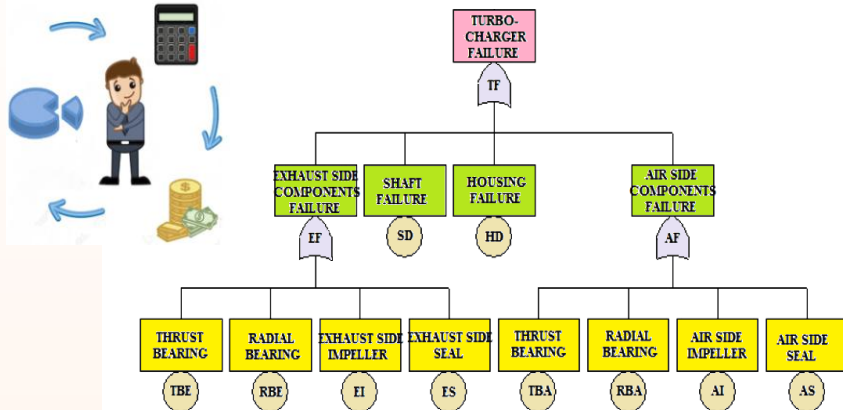
Методы определения причин неисправностей

Логико-вероятностный метод – построение и анализ дерева отказов

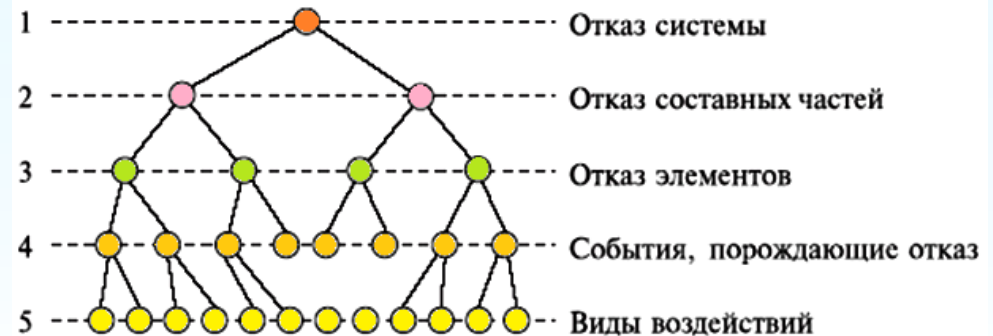
Дерево отказов – многоуровневая графологическая структура (граф) причинных взаимосвязей в системе, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения.

Составление дерева отказов:

- 1) конечное (аварийное) состояние системы,
- 2) подсистемы (составные части, элементы) и связанные с ними события, которые могут привести к отказу системы,
- 3) Воздействия, вызывающие эти события.



The fault tree of analyzed engine's turbocharger



Использование дерева отказов - для анализа надежности системы:

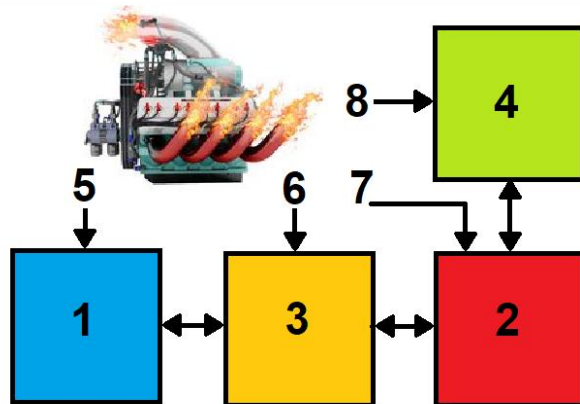
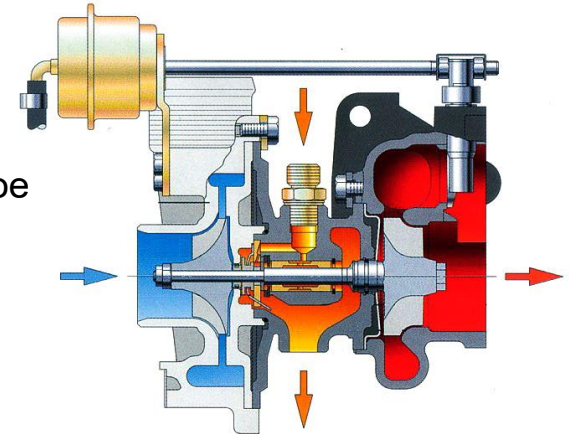
1. **Качественный анализ** - нахождение всех возможных комбинаций базисных или элементарных событий, которые могут обусловить наступление исследуемого конечного события (отказа).
2. **Количественный анализ дерева** - определении вероятности наступления конечного события (аварии) на основе данных о вероятностях наступления базисных событий (используется при проектировании).



Логический метод определения причин отказов – на примере агрегата ДВС

Характерные особенности турбокомпрессоров

- ❑ минимальные габариты для уменьшения задержки (турбоямы)
- ❑ чрезвычайно высокие обороты ротора (свыше 200.000),
- ❑ большая чувствительность к повреждениям - очень быстрое развитие неисправности (100.000 циклов за 30 сек),
- ❑ значительный масштаб разрушений - большое количество поврежденных деталей (первично и вторично),
- ❑ сильное влияние двигателя на неисправности ТКР и наоборот,
- ❑ сложность определения причины выхода из строя.



Блочная схема - 4 основных узла:

- 1) компрессор
- 2) турбина
- 3) подшипниковый узел
- 4) система управления (клапан Westgate или поворотные лопатки CA).



Внешние воздействия на ТКР (от ДВС):

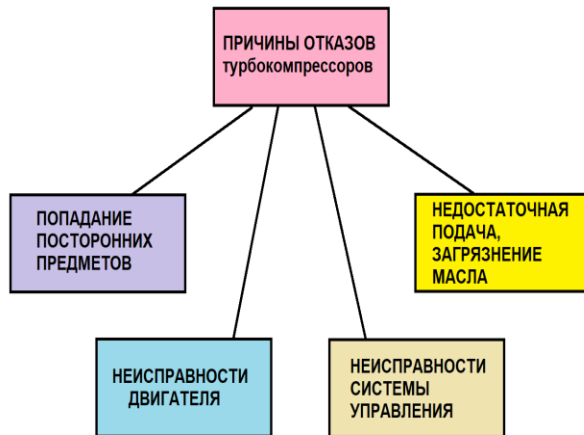
- 5- впускная система ДВС, 6- маслосистема и картер ДВС,
7- цилиндр и выпускной коллектор ДВС, 8- система управления ДВС



Логический метод определения причин отказов – на примере агрегата ДВС

Основные причины неисправностей (виды воздействий)

1. Неграмотная (грубая) эксплуатация.
2. Несвоевременное обслуживание двигателя.
3. Ошибки при обслуживании.
4. Некачественный ремонт.
5. Производственные дефекты.
6. Естественный износ.



Основная задача – связать имеющиеся признаки в единую систему

События, порождающие отказ (причины повреждения ТКР, если он рассматривается отдельно)

1. Попадание посторонних предметов в компрессор или турбину.
2. Недостаточная подача масла
3. Загрязнение масла
4. Заклинивание регулирующего механизма
5. Отказ системы управления
6. Превышение оборотов ротора (перекрут).
7. Перегрев турбины, корпусных деталей.



Признаки неисправностей

1. Которые видит водитель:

– потеря мощности двигателя, шум, дым, расход масла, самопроизвольный набор оборотов, контрольная лампа неисправности.

2. Которые видны при обслуживании транспортного средства:

- коды ошибок, внешние повреждения, течи жидкостей.

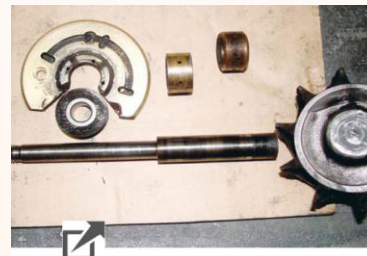
3. Которые видны на частично и полностью разобранном турбокомпрессоре и двигателе:

- различные повреждения и следы на деталях – компрессор, турбина, подшипниковый узел, система управления, а также впускная, выпускная системы и цилиндр двигателя, .

Признаки неисправностей агрегата

1. Компрессор

- 1) масло в компрессоре
- 2) износ, эрозия лопаток
- 3) задевание лопаток за корпус (большой радиальный и/или осевой люфт ротора)
- 4) повреждение (деформация) лопаток
- 5) обрыв лопатки
- 6) отворачивание гайки ротора
- 7) разрушение колеса компрессора



2. Турбина

- 1) масло (нагар) в турбине
- 2) задевание лопаток за корпус (большой радиальный и/или осевой люфт ротора)
- 3) повреждение (деформация) лопаток
- 4) перегрев лопаток
- 5) обрыв лопатки
- 6) разрушение вала (отделение от колеса)

Признаки неисправностей агрегата

3. Подшипниковый узел

- 1) течь масла в соединениях
- 2) течь ОЖ
- 3) повреждения шлангов
- 4) износ втулок подшипников и шеек вала
- 5) износ уплотнений
- 6) грязь и нагар в полостях и отверстиях
- 7) перегрев шеек вала
- 8) плавление подшипников
- 9) износ упорного подшипника
- 10) перегрев упорного подшипника
- 11) перегрев корпуса подшипников
- 12) деформация вала
- 13) разрушение вала



4. Система управления

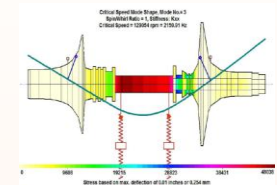
- 1) повреждение, заклинивание клапана Westgate
- 2) негерметичность мембраны привода клапана
- 3) повреждения вакуумных шлангов
- 4) повреждение привода клапана
- 5) заклинивание механизма поворота лопаток СА
- 6) повреждение, перегрев лопаток СА
- 7) отказ блока управления ТКР



Логическое определение причины неисправности агрегата для случая 1 вида отказа

ППП - попадание постороннего предмета в компрессор

- 1. Отказ системы** - неработоспособность турбокомпрессора
- 2. Отказ составных частей** - компрессор, турбина с валом, подшипниковый узел с уплотнениями:
 - вал ротора - усталостное разрушение
 - повреждение и/или разрушение уплотнительных колец (течь масла через уплотнения)
- 3. Отказ элементов** - колесо компрессора с лопатками, колесо турбины с лопатками и валом, втулки подшипников с уплотнениями
 - а) прямое повреждение:**
 - деформация и/или разрушение лопаток колеса компрессора (гайка вала и резьбовой хвостовик вала повреждены посторонним предметом, повреждение корпуса компрессора)
 - в) вторичное повреждение:**
 - перегрев и задиры подшипников
 - нарушение уплотнительных свойств колец (масло в корпусе компрессора, турбины)
 - повреждение турбины (касание колеса и корпуса, перегрев, повышенный шум)
- 4. События, порождающие отказ:**
 - а) первичные:** - повреждение лопаток колеса и корпуса компрессора (визуально)
 - в) вторичные:**
 - увеличение остаточного дисбаланса и люфтов ротора, рост виброускорения
 - касание колес корпусных деталей
 - рост радиальных нагрузок на опорные подшипники
 - пробой масляной пленки, работа подшипников в режиме полусухого трения
- 5. Виды воздействий** - способы попадания постороннего предмета:
 - оставлен во впускном канале при ремонте
 - попал через разрушенный воздушный фильтр
 - попал через негерметичное сопряжение или поврежденный воздухопровод

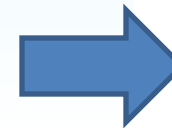
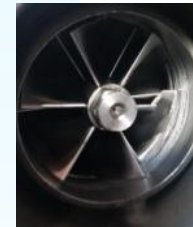


Логическое определение причины неисправности агрегата для случая 1 вида отказа



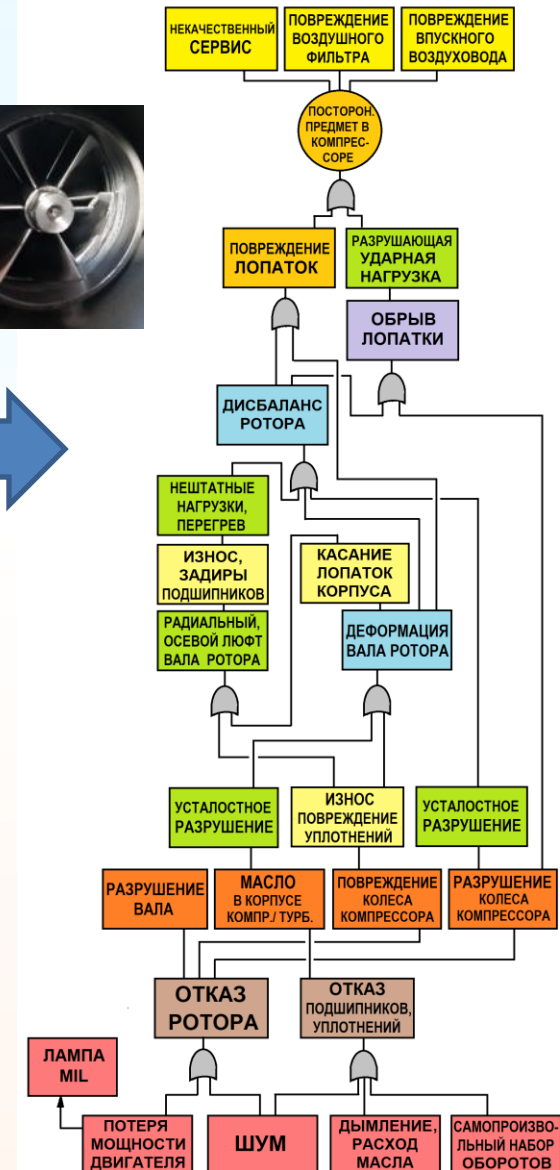
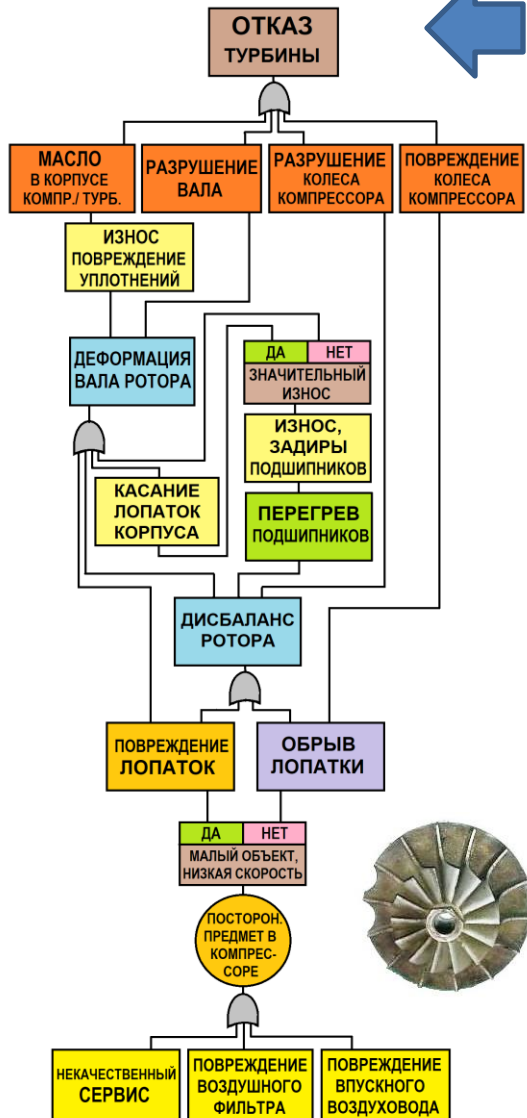
Модифицированное дерево отказов

- ❖ Каждое текущее событие может иметь логическую связь сразу с несколькими последующими процессами (событиями).
- ❖ Не вполне соответствует задаче определения причины неисправности по направлению анализа.



Перевернутое дерево отказов

- ❑ Каждое событие может иметь логическую связь как с несколькими предыдущими, так и несколькими последующими событиями
- ❑ Логически анализ идет не от базовых событий к отказу, а наоборот – от отказа к базовым событиям – в соответствии с направлением поиска причины неисправности.
- ❑ Отказ может быть разделен по признакам его проявления, видимым в эксплуатации транспортного средства.
- ❑ К каждому событию может быть добавлен процесс, его вызывающий, что облегчает логический анализ.



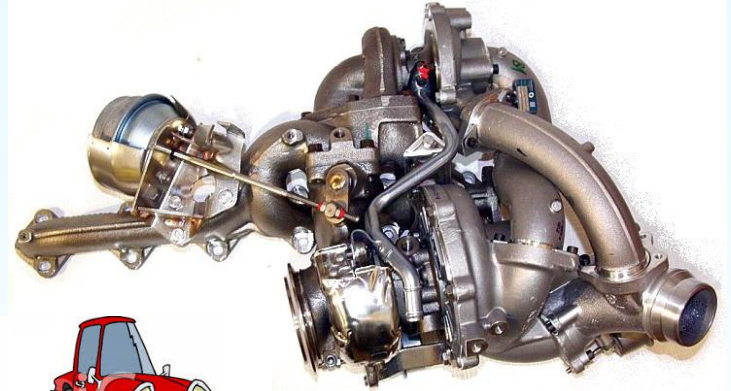


Построение логического графа дерева отказов двигателя

Предварительные замечания

Турбокомпрессор наддува

- количество узлов и деталей невелико,
- детали и узлы тесно взаимосвязаны
- вращение ротора происходит с очень высокой скоростью,
- даже незначительное нарушение режима работы одного элемента быстро развивается по времени,
- начальное повреждение дает большой масштаб повреждений многих деталей



ДВС

- ❖ количество деталей и узлов значительно
- ❖ нет глобальной взаимосвязи между узлами и деталями.
- ❖ вращение с невысокой или умеренно высокой скоростью
- ❖ начальные повреждения развиваются сравнительно медленно
- ❖ в эксплуатации ДВС отказы чаще вызваны локальными повреждениями отдельных сопряженных деталей,
- ❖ локальные повреждения нередко происходят без их расширения на многие другие элементы и узлы.

Непосредственно перенести и распространить результаты, полученные для отдельного агрегата, на весь двигатель в целом не представляется возможным.



Построение логического графа дерева отказов двигателя

Прямая и обратная логические схемы (направление анализа – снизу вверх), описывающие данные по отдельно выделенной неисправности (отказу)

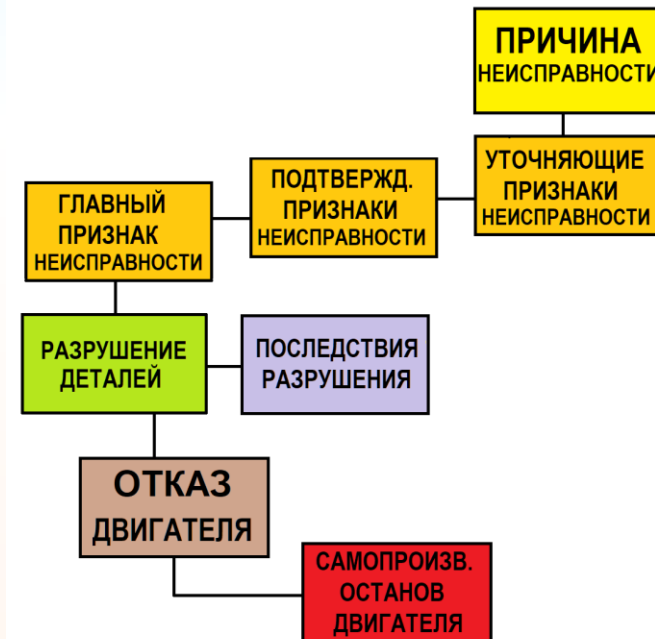
Разбиение признаков на группы (структурирование) – главные, подтверждающие (главный) и уточняющие (вид и место повреждающего воздействия).

Общая логическая схема в виде простого структурного графа:

- прямой анализ в направлении от причины к событию отказа двигателя (вероятность отказа)
- обратный анализ от отказа к причине (поиск причины отказа).



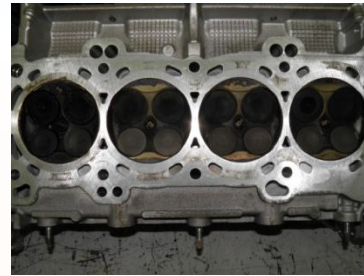
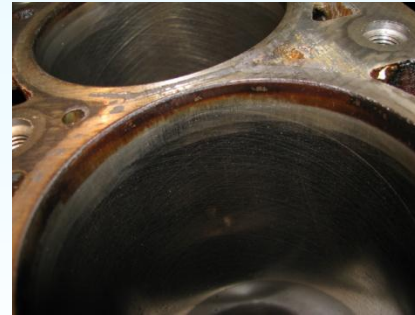
прямой анализ



обратный анализ

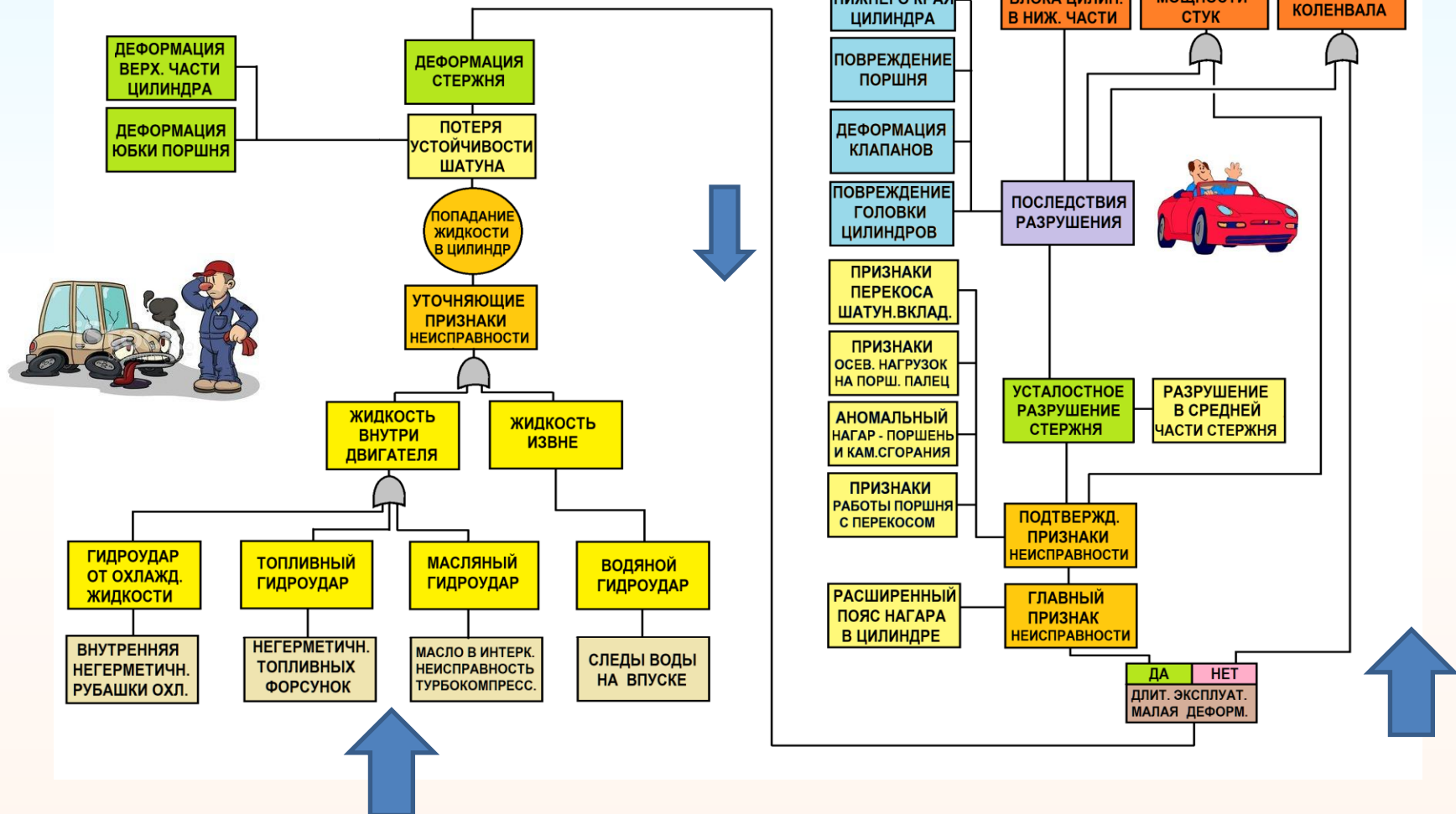
Построение логического графа дерева 1 отказа двигателя

Гидроудар - повреждение деталей и разрушение шатуна вследствие попадания в цилиндр различных жидкостей (10 признаков)

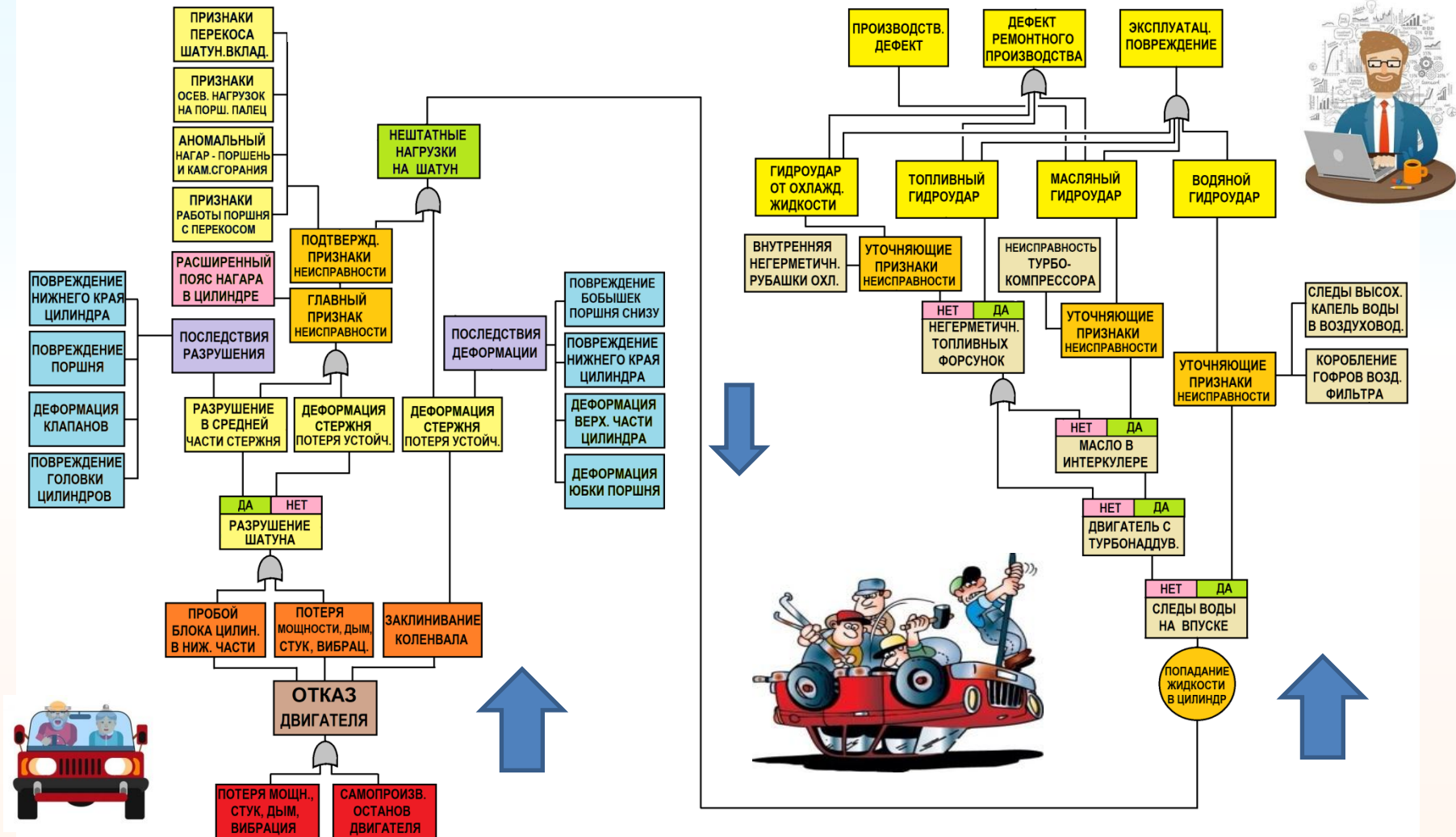


Построение логического графа дерева 1 отказа двигателя

Прямой анализ - от причины к событию отказа двигателя



Обратный анализ - от отказа к причине (поиск причины отказа)

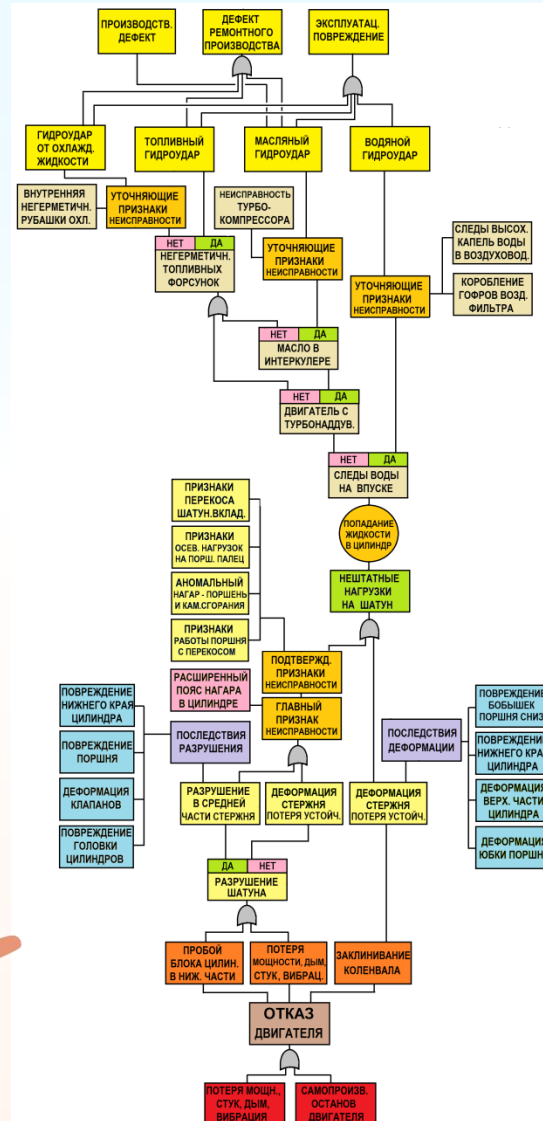
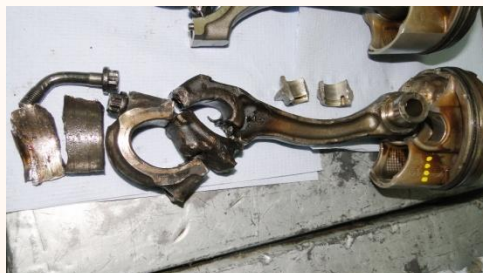


Построение логического графа дерева отказов двигателя на базе графов отдельных отказов

Основные трудности составления логического графа для ДВС в целом

1. Большое количество видов отказов ДВС → трудоемкость.
2. Для каждого вида отказа требуется разработать свой граф, после чего включить его в общую структуру дерева.
3. Ожидаемая структура логического графа для двигателя - 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.
4. Сложность, ограничение количества видов отказов, включенных в граф (например, объединение отказов в группы по определенным признакам).
5. Возможная ограниченная применимость.

Определения причины отказа возможно по заданному графом алгоритму логического поиска путем перемещения по графу от события отказа вверх в сторону причин отказа.



ВЫВОДЫ

1. 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, в исходном виде не соответствуют задачам поиска причин неисправностей.
2. Отсутствие надежных методик приводит к неправильному определению причины, повторению отказов и неоправданно высоким затратам в эксплуатации ДВС на повторные ремонты.
3. Выполненное исследование показало, что определение причин отказов поршневых ДВС возможно 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.
4. Для выбранных видов отказов определение причины отказа с помощью логического графа может быть сделано логическим путем с достаточной для практики достоверностью при минимальных затратах времени, что, по крайней мере, помогает исключить грубые ошибки при расследовании причин отказа.
5. 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.



Спасибо за внимание!



Александр Хрулев, к.т.н.
**Международное
моторное бюро**

Валентин Клименко
**Одесский национальный
морской университет**

