

УДК 681.518.5

© 2019 г. **В.В. Воронин**, д-р техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ДЕГРАДАЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ В КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Анализируется и описывается в фреймовой нотации деградационное представление технического объекта диагностирования (*ОД*), которое входит составной частью в перечень необходимых знаний для диагностической экспертной системы (*ДЭС*). Предлагается деградационное представление охарактеризовать двумя фреймами – техническим ресурсом *ОД* и его ремонтной историей. В работе раскрывается возможное содержание первого из этих фреймов.

Ключевые слова: объект диагностирования, деградационная модель, ресурс, система технического обслуживания, экспертная система, концептуальная диагностическая модель.

DOI: 10.22250/isu.2019.60.77-86

Введение

В самом общем случае диагностическая деятельность подразумевает наличие объекта деятельности – объекта диагностирования, субъекта диагностической деятельности и их внешнего окружения. Наличие, состояние и особенности указанных элементов будем характеризовать понятием «диагностическая ситуация» [1]. Описание возможных диагностических ситуаций – отправная точка процесса разработки концептуальной модели для последующего проектирования базы данных и базы знаний диагностических экспертных систем.

В конкретной диагностической ситуации участвует конкретный экземпляр *ОД*. Этот экземпляр является носителем текущего технического состояния, которое в рамках решаемой диагностической задачи предстоит опреде-

лить. На этапе эксплуатации в рамках задачи поиска дефектов в перечень необходимых знаний, кроме структурной организации *ОД* и множества его возможных дефектов, следует включить «исторические», или деградационные знания, а именно: ресурс и ремонтную историю. Этот перечень доминирует процесс построения алгоритма поиска дефектов.

Вопросам использования знаний о деградационных процессах в диагностических приложениях уделяется достаточно большое внимание. Они дифференцированы по классам объектов диагностирования. В [2] обобщены результаты исследований по разработке универсальной деградационной модели, пригодной для прогнозирования процесса изменения параметров, характеризующих техническое состояние энерго-механического оборудования горных машин.

В работе [3] предлагается оценка степени эксплуатационных повреждений наиболее нагруженных и ответственных узлов и деталей, а также прогноз их возможных изменений на предстоящий период эксплуатации судового энергетического оборудования.

В статье [4] сформулирован подход, который позволяет оценивать число циклов нагрузки, превышающих установленные по кривой усталости пороги количественных характеристик технического состояния подшипниковых опор роторных систем газотурбинных двигателей, в зависимости от накопленной ударной нагрузки.

В [5] предлагается метод оценки эксплуатационных повреждений и отказов деталей трансмиссии автомобилей, основанный на зависимостях их долговечности от механических характеристик материала и уровня действительных воздействий, обусловленных режимами работы автомобиля.

В данной работе приводятся результаты исследования обобщающего подхода, который обеспечивает возможность формального учета знаний о характеристиках деградационных процессов в концептуальной диагностической модели.

Постановка задачи

В большинстве диагностических экспертных систем недостаточно полно отражается зависимость эффективности диагностических процедур от особенностей системы технического обслуживания (*СТО*).

В работе [1] предложено включить в концептуальную диагностическую модель такую зависимость в форме Фрейма *ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ (X)* с взаимозависимыми слотами и их значениями (рис. 1).

Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ:
ОД (Фрейм ТЕХНИЧЕСКИЙ_ОБЪЕКТ);
Надсистема (Фрейм СТО, Фрейм СРЕДА).

Фрейм ТЕХНИЧЕСКИЙ_ОБЪЕКТ:
Экземпляр_ОД (Фрейм ИДЕНТИФИКАЦИЯ_ОД(X));
ТС_ОД (Фрейм ТЕХНИЧЕСКОЕ_СОСТОЯНИЕ(X)).

Фрейм ТЕХНИЧЕСКОЕ_СОСТОЯНИЕ(X):
Деградация (Фрейм РЕСУРС(X),
Фрейм РЕМОНТНАЯ_ИСТОРИЯ(X));
Вн_представление (Фрейм ДП_ОД(X));
ТМД (СПИСОК(Фрейм ДЕФЕКТ(x))).

Рис. 1. Фрагмент схемы концептуальной диагностической модели.

Основная задача данной работы – исследовать и раскрыть содержание слота *Деградация* концептуальной диагностической модели в части описания в принятой нотации фрейма *РЕСУРС(X)* для текущего экземпляра объекта диагностирования.

Ресурсные характеристики объекта диагностирования

Внешнее представление объекта диагностирования, характеризующее внешними диагностическими показателями (рис. 1), и его структурные представления (иерархическое, функциональное и конструктивное) не учитывают явно изменения свойств объекта во времени.

В теории надежности, в частности, в технической диагностике фактор времени является независимой переменной деградационных процессов. Одни характеристики деградационного представления *ОД* в *ДЭС* могут быть описаны временными надежностными показателями [6], заданными на всем эксплуатационном отрезке. Другие, – например, текущий моторесурс *ОД* – должны быть представлены в *ДЭС* явно [7].

В медицинской диагностике фактор времени всегда учитывается как в практической [8], так и в научной деятельности [9]. Здесь время присутствует в виде следующих терминов: период динамики, фаза течения заболевания, история болезни, история жизни и др.

В историческом плане важно различать понятия *состояние ОД* и *техническое состояние ОД*. Термин *состояние ОД* характеризует «кратковременную» память технического объекта относительно входных воздействий в текущий эксплуатационный момент, а термин *техническое состояние* – "долговременную" память *ОД* относительно входных воздействий различного типа

на всем предыдущем временном отрезке эксплуатации.

Как связаны сущности, отражаемые терминами «состояние» и «техническое состояние»? Опыт эксплуатации технических объектов позволяет сформулировать суждение о том, что они взаимозависимы. С одной стороны, изменение технического состояния изменяет качество процесса функционирования, с другой стороны, процесс функционирования – это одна из движущих сил деградиационных изменений. Чем "хуже" техническое состояние *ОД*, тем "ниже качество" процесса функционирования, а чем "ниже качество" функционального процесса, тем ощутимее его влияние на характер изменения технического состояния.

Данный цикл взаимовлияния характеризует внутренние причины деградации объекта диагностирования в дополнение к внешним причинам (эксплуатационная нагрузка и негативное влияние среды).

Термин «состояние» имеет смысловую нагрузку как понятие функционального состояния. Функциональное состояние – это характеристика процесса функционирования, а техническое состояние – характеристика деградиационного процесса. Данное функциональное состояние при эксплуатации может повториться многократно; данное техническое состояние на этом отрезке объективно не повторяется, но субъективно его можно повторить при соответствующем воздействии со стороны *СТО*.

Таким образом, термин "техническое состояние" отражает два момента. Во-первых, степень деградации или позиционирование данного экземпляра *ОД* на деградиационной шкале – внутри отрезка времени, соответствующего периоду эксплуатации. Во-вторых, текущее множество дефектов данного экземпляра *ОД* или его позиционирование в пространстве неисправных состояний.

В практических приложениях [4, 6, 10 –12] принято позицию *ОД* в отношении деградиационных процессов описывать термином «*технический ресурс*» (назначенный, остаточный или критический ресурс). В концептуальной диагностической модели этот термин представлен фреймом *РЕСУРС(X)*, параметр которого *X* соответствует текущему экземпляру *ОД*.

На рис. 2 представлены результаты раскрытия семантического содержания данного фрейма. Современные технические *ОД* в своем большинстве относятся к классу сложных систем, в конструктивное представление которых входят тысячи и десятки тысяч элементов, имеющих существенный разброс в показателях долговечности. Получить формальное описание процесса изменения технического ресурса таких объектов, включающее все его элементы, практически невозможно.

Фрейм <i>РЕСУРС(X)</i> :	
<i>Доминанты_ОД</i>	(<i>ЗАПРОС_ДБ(Y)</i> ,
	Фрейм <i>РЕСУРС_ДБ(X,Y,r)</i>);
<i>Индикаторы</i>	(Фрейм <i>ИНДИКАТОР_ДБ(X,Y,i)</i>);
<i>Компенсаторы</i>	(Фрейм <i>КОМПЕНСАТОР_ДБ(X,Y,k)</i>).
Фрейм <i>РЕСУРС_ДБ(X,Y,r)</i> :	
<i>Расчетный</i>	Фрейм <i>МВЗ(x)</i>);
<i>Текущий</i>	(<i>ЗАПРОС_МД(T,X,Y,r, Фрейм МВЗ(x))</i>);
<i>Расчетный</i>	(<i>SUB(Расчетный(x), Текущий(r))</i>).
Фрейм <i>МВЗ(x)</i> :	
<i>Переменная</i>	(Фрейм <i>КОЛИЧЕСТВО(x) </i>
	Фрейм <i>КАЧЕСТВО(x) </i>
	<i>ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ(Фрейм НМ(x,y))</i>);
<i>Множество</i>	(Фрейм <i>СТРУКТУРА(x)</i>).
Фрейм <i>КОЛИЧЕСТВО(x)</i> :	
<i>Значение</i>	(<i><число></i>);
[<i>Вероятность</i>	(<i><число></i>)]].
Фрейм <i>КАЧЕСТВО(x)</i> :	
<i>Значение</i>	(<i><строка></i>);
[<i>Вероятность</i>	(<i><число></i>)]].
Фрейм <i>НМ(x,y)</i> :	
<i>Базовое_множество</i>	(<i>СПИСОК((<i><число> <строка></i>);</i>
<i>Функция_принадлежности</i>	(<i>СПИСОК(<число></i>)).
Фрейм <i>СТРУКТУРА(x)</i> :	
<i>Элементы</i>	(<i>СПИСОК(Фрейм МВЗ(x))</i>);
[<i>Ограничения</i>	(<i>СПИСОК(<строка></i>)]].

Рис. 2. Деградационное представление ОД.

Выходом из данной ситуации является простое и очевидное предложение научно-технического сообщества [3 – 5,10,13] – целесообразно выделить наиболее критичные (с точки зрения долговечности) один или несколько элементов и произвести оценку суммарного воздействия на них внутренних и внешних нагрузок во времени. Обычно такие элементы в научных публикациях называют наиболее нагруженными и ответственными узлами, или ресурсоограничивающими блоками. Назовем такие блоки доминантами объекта диагностирования.

Следуя общепринятому подходу, включим в **Фрейм** *РЕСУРС(X)* в качестве основного слот *Доминанты_ОД*, значения которого определяет функция *ЗАПРОС_ДБ(Y)*, обеспечивающая доступ к ресурсоограничивающему диагностическому блоку *Y* экземпляра *ОД X*, а также **Фрейм** *РЕСУРС_ДБ(X,Y,r)*,

выходной параметр r которого имеет значение текущего ресурса данного блока.

Следующий слот **Фрейма** $РЕСУРС(X) – Индикаторы$ – предназначается для явного фиксирования ситуаций, соответствующих состоянию предельно допустимого ресурса. Показательным примером индикатора может служить вмонтирование при производстве в различные детали двигателя внутреннего сгорания различных химических элементов, присущих только этим деталям. Далее по факту появления в картерном масле двигателя того или иного химического элемента фиксируется состояние предельного износа определенной ресурсоограничивающей детали [10]. Значением данного слота является **Фрейм** $ИНДИКАТОР_ДБ(X,Y,i)$, выходной параметр i которого предназначен для фиксации факта наступления состояния предельно допустимого ресурса.

Последний слот **Фрейма** $РЕСУРС(X) – Компенсаторы$ – предназначается для явного описания возможной существенной особенности ресурсоограничивающего блока, характеризуемой наличием в данном блоке специального механизма, позволяющего в определенных пределах компенсировать накопленную деградацию. Примером такого механизма служит самокомпенсация растяжения ремня в процессе функционирования ременной передачи [14]. Значением данного слота является **Фрейм** $КОМПЕНСАТОР_ДБ(X,Y,k)$, выходной параметр k которого предназначен для оценки степени компенсации накопленной деградации.

Индикаторы и компенсаторы параметров накопленной деградации (износ, коррозия, усталость материала, массоперенос, число циклов нагрузки, превышающих установленные нормы, накопленная ударная нагрузка, вытяжение и др.) имеют существенные особенности в зависимости от класса $ОД$, и раскрытие содержания соответствующих фреймов в концептуальной диагностической модели должно выполняться для каждого такого класса в отдельности.

В состав **Фрейма** $РЕСУРС_ДБ(X,Y,r)$ предлагается включить слоты *Расчетный*, *Текущий* и *Остаточный*, соответствующие различным показателям ресурса ресурсоограничивающего блока. Значение первого слота раскрывается **Фреймом** $МВЗ(x)$, описывающего множество возможных значений показателя; второго – функцией $ЗАПРОС_МД(T,X,Y,r, \text{Фрейм } МВЗ(x))$, которая обращается к модели деградации данного блока с входным параметром T текущего времени; третьего – функцией $SUB(\text{Расчетный}(x), \text{Текущий}(r))$, определяющей значение остаточного ресурса блока.

Фрейм $МВЗ(x)$ определяется двумя слотами, позволяющими задать

единственное или множественное значение. Первый слот раскрывается фреймами соответствующими или количественной, или качественной, или лингвистической переменным. Второй слот позволяет сформировать множественный показатель в виде некоторой структуры.

В случае лингвистической переменной вызывается функция *ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ(Фрейм НМ(x,y))* с параметром в виде фрейма, соответствующего нечеткому множеству, которое описывается определенным базовым множеством и заданной функцией принадлежности.

На рис. 2 осталось не раскрытым содержание функции, позволяющей вычислить текущий ресурс для определенного диагностического блока. Анализ возможного подхода к описанию этой функции дается в следующем разделе.

Модель накопленной деградации ресурсоограничивающего блока

В настоящее время в связи с повсеместным внедрением современных информационных технологий наметилась тенденция повышения культуры эксплуатации и дисциплины технического обслуживания. Это справедливо и в отношении диагностических задач. Появилась возможность реализации научно обоснованной стратегии управления деградационными процессами индивидуального экземпляра объекта диагностирования. Как следствие, данная возможность должна быть отражена в концептуальной диагностической модели, и на рис. 2 начальная точка такого отражения представлена функцией *ЗАПРОС_МД(T,X,Y,r, Фрейм МВЗ(x))*, которая обращается к модели деградации данного ресурсоограничивающего блока.

Формально модель накопления деградации для различных блоков предлагается хранить в двух вариантах. Первый вариант – в табличной форме (числовые или описательные значения для каждого определенного отрезка эксплуатационного времени), по значения входного параметра T определяется отрезок времени, далее – соответствующее значение текущего ресурса. При этом всему отрезку периода эксплуатации $[x_{\min}, x_{\max}]$ поставим в соответствие конечное множество $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. Число n элементов этого множества определяется числом отрезков, полученных разбиением исходного отрезка (рис. 3). В простейшем случае значение каждого элемента v_i можно задать равенством $v_i = i$.

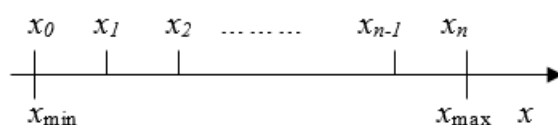


Рис. 3. Число отрезков, полученных разбиением исходного.

Такое преобразование входного параметра можно выполнить, вычисляя значение следующей функции

$$V = f(x) = \sum_{i=1}^n [i\mathbf{1}(x - x_{i-1}) - i\mathbf{1}(x - x_{i+1})], \quad (1)$$

где $\mathbf{1}(z)$ – единичная функция, такая, что при $z \leq 0$, $\mathbf{1}(z) = 0$; при $z > 0$, $\mathbf{1}(z) = 1$; x_{i-1} , x_i – нижняя и верхняя соответственно границы i -го отрезка разбиения исходного интервала $[x_{\min}, x_{\max}]$ (рис. 3). Функция (1) равна номеру отрезка разбиения, если значение входного параметра находится внутри этого отрезка. Таким образом, входной параметр принимает целые значения от 1 до n , по которым из хранимой таблицы выбирается соответствующее значение (числовое или описательное) текущего ресурса.

Второй вариант – в аналитической форме (определенный интеграл с верхним переменным пределом), значение T подставляется на место верхнего предела, и вычисленное значение интеграла определит прямой показатель текущего ресурса $R(T)$ данного блока.

$$r = R(T) = \int_0^T H(s) ds, \quad (2)$$

где переменная s имеет смысл источника деградации; $H(s)$ – чувствительность прямого показателя текущего ресурса к источнику деградации.

В общем случае накопленная деградация определяется внутренними и внешними источниками. Внешние источники характеризуют эксплуатационную нагрузку и эксплуатационную среду (см. рис. 1). Внутренние источники – контур взаимовлияния функционального и технического состояний (см. преамбулу к предыдущему разделу). Поэтому подынтегральное выражение в формуле (2) логично представить в виде трех частей, введя понятия чувствительности ресурса к эксплуатационной нагрузке, к эксплуатационной среде и к возможным неисправным техническим состояниям. В простейшем варианте эти чувствительности можно объединить в выражении (2) по аддитивному принципу.

В качестве примеров прямых показателей ресурса можно привести следующие простые физические величины: уровень содержания продуктов износа в масле, число циклов нагрузки, превышающих установленные по кривой усталости пороги, параметры накопленной ударной нагрузки, параметры виброускорений, параметры усталостных трещин материала, геометрические параметры износа, параметры коррозии, параметры растяжения гибких передач и др. Примером сложного показателя может служить аналитическое выражение, включающее процентное содержание ферромагнитных частиц в масле и значение максимальных амплитуд виброускорений [15]. Чаше других

сложных показателей ресурса используют уравнения множественной регрессии.

Заключение

В данной работе предложен фрагмент концептуальной диагностической модели, включающий характеристики деградиционного представления объекта диагностирования, которые планируется учитывать в разработках диагностических экспертных систем.

Диагностическая экспертная система – это инструмент, который помогает субъекту диагностической деятельности обоснованно принять решение о текущем техническом состоянии *ОД*. Поэтому база знаний экспертной системы с необходимостью должна содержать знания о накопленной деградации за весь предыдущий период эксплуатации [16].

В дальнейших исследованиях планируется раскрыть содержание понятия «ремонтная история» и увязать его с показателями технического ресурса, включая различные классы объектов диагностирования [17].

Понятия ресурса и ремонтной истории, с одной стороны, являются формализмом деградиционного представления *ОД*, а с другой, они характеризуют систему технического обслуживания, одна из основных функций которой – обеспечение эффективности эксплуатационного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронин В.В.* Система технического обслуживания в концептуальной модели технических объектов // Информатика и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 67-74.
2. *Герике П.Б.* К вопросу создания универсальной прогностической деградиционной модели для энерго-механического оборудования горных машин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 72-81.
3. *Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А., Хруцкий О.В.* Методы прогнозирования технического состояния судового энергетического оборудования // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 4 (386). – С. 117-132.
4. *Охтилев М.Ю., Хищенко В.И., Коромысличенко В.Н., Ключарев А.А., Зубко А.И.* Мониторинг прецессии роторных систем газотурбинных двигателей и оценка состояния межроторных подшипников // Проблемы региональной энергетики. – 2018. – №1 (36). – С. 12-25.
5. *Аубекеров Н.А., Аубекерова Ж.Н., Сунгатоллакызы А., Сагынбекова А.А.* Индивидуальное прогнозирование отказов деталей автомобиля с учетом действительных режимов их работы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 1. – С. 16-20.
6. *Керученко Л.С., Мальцева Е.И.* Использование статистических методов для оценки предельного содержания продуктов износа в моторных маслах // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – №1 (21). – С. 255-260.

7. *Ишиметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э.* Автоматизированная система измерения зазоров в подшипниках качения // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2017. – №2 (35). – С. 61-66.
8. *Крупчатников Р.А., Мишустин В.Н., Артеменко М.В., Добровольский И.И.* Методы диагностики и факторы риска прогноза тромбоза в системах поддержки принятия решений // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение».* – 2017. – Т. 7, № 1 (22). – С. 69-81.
9. *Каменев А.В., Клещев А.С., Черняховская М.Ю.* Логическая модель причинно-следственных отношений различных типов в области медицинской диагностики: Препринт / ИАПУ ДВО РАН. – Владивосток, 2003.
10. *Ревякин М.М.* Реализация назначенного ресурса двигателя путем контроля условий эксплуатации по параметру удельного химмотологического показателя моторного масла // *Агротехника и энергообеспечение.* – 2017. – № 2 (15). С. 62-67.
11. *Викторов Н.А., Кириленко Н.М.* О сроках технического диагностирования и ресурсе технологических трубопроводов // *Безопасность труда в промышленности.* – 2011. – № 5. – С. 54-57.
12. *Кузнецов А.А., Пономарев А.В., Мешкова О.Б., Бучельникова О.С.* Возможности приборов лиэс для определения коррозионного состояния железобетонных конструкций при длительной эксплуатации // *Современные наукоемкие технологии.* – 2015. – № 12-4. – С. 610-614.
13. *Марусин А.В., Данилов И.К., Успенский И.А., Кокорев Г.Д., Шемякин А.В., Терентьев В.В.* Анализ и обоснование разработки диагностического устройства топливной аппаратуры автотракторных дизелей // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева.* – 2017. – № 3 (35). – С. 102-106.
14. *Мечкало Л.Ф., Мечкало А.Л.* Ременные передачи – реальность и возможности // *Агро-СнабФорум.* – 2016. – № 4 (143). С. 26-30.
15. *Мозгалецкий А.В., Тарасенко В.И., Костанди Г.Г.* Автоматизация процессов диагностирования при технической эксплуатации автомобилей. – Хабаровск: Изд-во ХПИ, 1982.
16. *Гаскаров Д.В., Строганов В.И., Францев В.И.* Системы прогнозирования на экспертной основе. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.
17. *Шалобанов С.В., Шалобанов С.С.* Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием смены позиции входного сигнала // *Информатика и системы управления.* – 2016. – № 2. – С. 91-96.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:

Воронин Владимир Викторович – 004183@pnu.edu.ru.