

УДК 656.062: 311.21

Совершенствование методики поиска неисправностей в технических системах

Грузин Владимир Васильевич, д.т.н., профессор
Бердибеков Айдар Токтамысович, доктор PhD, полковник
Доля Александр Валерьевич, магистр, капитан

Национальный университет обороны имени Первого Президента Республики Казахстан – Елбасы

Аннотация. В статье сформулированы требования, предъявляемые к современному технологическому процессу диагностирования техники, которые установлены на основании представления технических систем, как сложных, включающих в себя значительное количество взаимосвязанных между собой подсистем и элементов. Поэтому на основании информации от всего количества сопряжений и деталей, входящих в техническую систему для установления их технического состояния, усовершенствован метод диагностирования, основанный на условных вероятностях появления неисправностей с учетом последовательности поиска неисправных элементов.

Снижение трудоемкости диагностирования достигается путем прекращения проверочных операций с установлением неисправностей в ресурсном сопряжении. При этом минимальное значение энтропии будет в том случае, когда вероятности появления и отсутствия неисправностей будут близкими друг другу.

Материалы для данной статьи подготовлены в рамках научного проекта №АР05135518 «Военная логистика: особенности создания интегрированной системы материально-технического обеспечения в Вооруженных Силах Республики Казахстан».

Ключевые слова: материально-техническое обеспечение, методика, диагностирование, мониторинг, техническая система, неисправность, контроль, энтропия, технологический процесс.

Введение

Современные исследования существующих методов и средств повышения эффективности технического диагностирования с целью своевременного установления неисправности технических систем настоящее время требуют дальнейшего своего совершенствования в решении еще недостаточно исследованных вопросов, таких как [1-10]:

- 1) снижение трудоемкости процесса диагностирования при получении информации о техническом состоянии машин;
- 2) измерение параметров состояния проверяемых объектов с оптимальной точностью;
- 3) совершенствование оптимальных/рациональных технологических процессов диагностирования машин на основе их декомпозиции.

Требования, предъявляемые к современному технологическому процессу диагностирования техники, заключаются, прежде всего в том, что существующие сложные технические системы включают в себя значительное количество подсистем и элементов, поэтому для установления их технического состояния или даже отдельно взятого агрегата и узла необходимо иметь однозначную информацию от значительного большого количества сопряжений и деталей, входящих в них [2-4].

1. Особенности разработки рациональной последовательности контроля работоспособности технических систем

Определение оптимальной последовательности контроля простым перебором из-за большого объема расчетных операций затруднительно, так как количество возможных вариантов будет значительным, которое определяется по формуле перестановок. Например, если механизмов (подсистем) в агрегате 7, то число возможных последовательностей проверки на работоспособность может составлять более 5000.

Наиболее простым методом поиска оптимальной стратегии контроля работоспособности техники является постепенное, пошаговое приближение принятой неоптимальной последовательности к оптимальной, так называемое динамическое программирование, в котором при каждом шаге расчета должно соблюдаться следующее условие:

$$T_{(r,s)} - T_{(s,r)} > 0, \quad (1)$$

где $T_{(r,s)}$ - первоначальная принятая стратегия (последовательность);

$T_{(s,r)}$ - улучшенная стратегия.

Величина снижения продолжительности контроля может быть определена на основании следующих рассуждений.

1) Допустим, что продолжительность проверки первого механизма в последовательности составляет T_1 , последующего T_2 , а вероятность отправки на ремонт двигателя по результатам диагностирования первого механизма равна P_1 . В таком случае второй механизм будет продиагностирован только с вероятностью $1-P_1$. Тогда снижение продолжительности контроля первых двух механизмов составит:

$$\Delta T_i = T_2 P_1, \quad (2)$$

Общее снижение трудоемкости диагностирования будет подсчитываться в соответствии с изложенной методикой, определится как:

$$\Delta T_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m T_{i+1} \cdot P_i \quad (3)$$

где T_{i+1} - продолжительность контроля работоспособности $(i+1)$ -го механизма, (с);

P_i - вероятность отправки агрегата на ремонт по результатам проверки i -го механизма.

При этом, снижение трудоемкости диагностирования может быть достигнуто путем прекращения проверочных операций на основании появления не-

исправностей в ресурсном сопряжении. Поэтому последовательность контроля будет начинаться с одного из механизмов, имеющего ресурсные сопряжения. Особенности применения разработки рацио-

нальной последовательности контроля работоспособности технических систем рассмотрим на следующем примере. Пример. Разработать программу контроля работоспособности механизмов, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Значения контроля механизмов строительных машин

№ обозначения механизмов	Проверяемые механизмы	Продолжительность контроля, с
1	Кривошипно-шатунный механизм с системой смазки	230
2	Цилиндро-поршневая группа	460
3	Система охлаждения	270
4	Система питания	1560
5	Механизм газораспределения	470
6	Муфта сцепления	360

В качестве пояснения отметим, что в таблицу 4 внесены дополнительные номера обозначения механизмов, которые будут использованы при расчете и значительно сократят объем повторяющихся названий механизмов. Следует так же отметить, что вероятности в потребности при ремонте в расчетных операциях приняты по известным данным, приводимым

в нормативных документах по срокам службы деталей. Все расчеты по определению оптимальной последовательности контроля работоспособности сведены в таблицу решений (см. таблицу 5).

Как видно из результатов расчета, представленных в таблице 2, оптимальной программой проверки работоспособности двигателей СМД перед их ремонтом будет следующая последовательность 1-2-3-4-5.

Таблица 2. Программа проверки работоспособности дизельных двигателей

№ пп	Проверяемые объекты	Вероятность появления неисправностей	Обозначение параметров проверки	Неисправности				
				1	1	0	0	0
1	Форсунка	0,136	X1	1	1	0	0	0
2	Механизм опережения подачи	0,621	X2	1	1	0	0	0
3	Регулятор топливного насоса	0,071	X3	0	0	1	0	0
4	Обратный клапан	0,048	X4	1	0	0	1	1
5	Плунжерная пара	0,124	X5	1	0	0	1	1

Такая последовательность позволяет снизить трудоемкость диагностирования на работоспособность на 15,3 % по сравнению с контролем всех механизмов.

Если в результате проверки механизма на работоспособность окажется, что он не работоспособен, то появляется необходимость в поиске неисправного элемента.

2. Особенности поиска неисправностей в технических системах на основе метода половинного деления числа проверок

Наиболее простым и наглядным методом разработки последовательности поиска неисправностей является метод половинного деления числа проверок [2, 3]. Этот метод приемлем, когда между элементами механизма имеется только конъюнкционная связь. В этом случае методика построения программы поиска неисправностей производится в следующей последовательности:

1) Элементы механизма условно с середины разбиваются на две равные половины.

2) Производится проверка на работоспособность одной из половин.

3) Если не обнаружена неисправность в этой половине, то производится проверка на работоспособность второй половинки.

4) Если не обнаружена неисправность, то эта половина опять разбивается на равные части и производится проверка каждой из новых половинок.

Такая разбивка процесса проверки производится до тех пор, пока не будет обнаружен неисправный элемент. Этот метод эффективен тогда, когда в механизме достаточно большое количество элементов, так как количество проверок равно логарифму при основании «2» или:

$$\alpha = \log_2 n_{\Sigma} \quad (4)$$

где α - количество проверок, (шт.);

n_{Σ} - количество проверок для выяснения неисправного элемента в механизме, (шт).

Так, например, если механизм имеет 10 элементов, то количество проверок будет 3,32 или 4, если 100 элементов, то 6,64 или 7, если уже 1000 элементов, то 9,96 или 10. Приведенный пример наглядно показывает, что в технических системах такого большого количества конъюнкционных связей не может быть, и поэтому этот метод имеет несколько ограниченное применение для поиска неисправностей. В связи с этим, выше приведенный метод может быть усовершенствован в следующий метод, заключающийся в определении последовательности поиска неисправного элемента в неработоспособном механизме так, чтобы каждый шаг проверки показывал максимум информации, что обеспечивается выполнением равенства:

$$H_y = -P_{i0} \log_2 P_{i0} + P_{i1} \log_2 P_{i1} \rightarrow 0 \quad (5)$$

где H_y - условная энтропия исхода проверки (мера неопределенности информации);

P_{11} и P_{10} – условные вероятности появления и отсутствия неисправности элемента.

В соответствии с выражением (5), минимальное значение энтропии будет в том случае, когда вероятности появления и отсутствия неисправностей будут достаточно близкими друг другу. Поэтому, для получения максимальной информации первоначально осуществляют контроль с элемента, у которого вероятности появления и отсутствия неисправностей являются по величине наиболее близкими.

При этом влияние принятого за неисправный элемент на работу других кодируется знаком 1, а если влияние отсутствует, то знаком 0. Такой анализ производится для всех контролируемых элементов.

В качестве примера предлагаемой методики расчетных операций рассмотрим поиск неисправностей в системе питания дизельного двигателя. Из кон-

структивных особенностей и анализа работы системы питания дизельных двигателей известно, что она подразделяется на три части: топливную систему низкого давления, топливную систему высокого давления и систему обеспечения двигателя воздухом. В рассматриваемом примере будет представлена последовательность поиска неисправностей для второй части – топливной системы высокого давления. Разработка последовательности поиска неисправностей начинается с кодирования неисправностей, приведенной в таблице 2. В качестве примечания отметим, что в таблице 2 вероятности появления неисправностей нормированы, то есть сумма всех вероятностей появления неисправностей принята за единицу, а вероятности появления отдельных неисправностей приняты пропорционально этой единице.

Для определения первого шага проверки составим следующую таблицу 3.

Таблица 3. Оценка вероятностей состояния обратного клапана.

Условные вероятности	Параметры				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
P ₁	0,91	0,91	0,09	0,34	0,34
P ₂	0,09	0,09	0,91	0,66	0,62
P ₃	0,82	0,82	0,82	0,32	0,32

На основании показателей таблицы 3 следует, что первым нужно оценить либо состояние обратного клапана, либо плунжерной пары. Остальные параметры должны быть продиагностированы в следующей очередности: регулятор, угол опережения подачи топлива и форсунка.

Изложенный выше метод не учитывает такую важную сторону технического диагностирования технических систем, как ценность получаемой информации. В действительности диагностирование производится только с целью оценки состояния объекта проверки и при этом, если обнаруживается неисправность ресурсного сопряжения, то проведенные до этого проверочные операции теряют смысл и дальнейшая работа становится бесполезной. Эта объясняется тем, что при появлении неисправности в ресурсном состоянии агрегат должен быть отправлен на ремонт.

3. Совершенствование методики поиска неисправностей в технических системах

Из изложенного можно прийти к выводу, что в качестве ценности информации должна быть принята продолжительность разборки механизма, которая необходима для устранения неисправности ресурсного сопряжения. Этот критерий наиболее правильно отражает ценность получаемой информации, так как нет других критериев, подразделяющих сопряжения на ресурсные и не ресурсные. При введении критерия ценности получаемой информации выражение примет следующий вид:

$$H_i = \frac{-P_{i1} \log_2 P_{i1} + P_{i0} \log_2 P_{i0}}{T_{pi}}, \quad (6)$$

где T_{pi} – продолжительность разборки агрегата для устранения неисправности i -го элемента, (с).

Наиболее ценным в отношении получаемой информации при поиске неисправности, согласно выражения (6) является наименьшее значение дроби, так как максимальное значение энтропии соответствует минимуму числителя, максимум знаменателя усиливает принятый критерий. Следовательно, последовательность поиска неисправности элементов, имеющих ресурсные сопряжения, необходимо построить по принципу уменьшения ценности получаемой информации.

Для пояснения данной методики построения последовательности поиска неисправностей техники рассмотрим, пример, построения последовательности поиска неисправности в системе смазки дизельного двигателя. В качестве примечания отметим, что трудозатраты на устранение в случае появления в элементах данной системы неисправностей в сопряжениях коленчатого вала будет затрачивается около 10 часов, тогда как неисправность сливного канала устраняется затратами всего 0,2 часа [2].

Необходимые данные для расчета, а также обозначения элементов системы приведены в таблице 4.

В следующей таблице кодированы возможные неисправности системы смазки дизельного двигателя (см. таблицу 5), выполненные на основании логической функции работы.

Используя данные таблиц 4 и 4, составлена таблица вычисления программы поиска неисправностей в системе смазки – таблица 6.

Как видно из таблицы решений, первым в последовательности поиска неисправностей необходимо оценить состояние сопряжения коленчатого вала и механизма газораспределения. Далее определяется второй и третий элементы проверки в последовательности диагностирования. Для этих целей строится таблица решений 7.

Таблица 4. Вероятность появления неисправности и трудоемкость разборки дизельного двигателя при устранении неисправности

№ пп	Элементы системы	Обозначение элементов	Вероятность появления неисправности		Трудоемкость разборки двигателя при устранении неисправности, час
			фактическая	нормированная	
1	Сопряжение коленчатого вала и механизма газораспределения	X ₁	0,0383	0,33	8,95
2	Масляный насос	X ₂	0,0162	0,14	4,28
3	Редукционный клапан	X ₃	0,0230	0,19	4,28
4	Секция фильтров	X ₄	0,0127	0,11	0,20
5	Перепускной клапан	X ₅	0,0230	0,19	0,20
6	Сливной клапан	X ₆	0,0043	0,40	0,20

Таблица 5. Возможные неисправности системы смазки двигателя

№пп	Механизм двигателя	Обозначение элементов	Неисправности					
			n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	n ₆
1	Сопряжение коленчатого вала и механизма газораспределения	X ₁	1	1	1	0	0	1
2	Масляный насос	X ₂	0	1	1	0	0	0
3	Редукционный клапан	X ₃	0	1	1	0	0	0
4	Секция фильтров	X ₄	0	1	1	1	0	0
5	Перепускной клапан	X ₅	0	1	1	0	1	0
6	Сливной клапан	X ₆	0	1	1	0	0	1

Таблица 6. Программы поиска неисправностей в системе смазки

№пп	Условные вероятности	Параметры					
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	P _{и1}	0,70	0,31	0,31	0,44	0,52	0,37
2	P _{и0}	0,30	0,69	0,60	0,56	0,48	0,63
3	Δ P _i	0,40	0,38	0,38	0,12	0,04	0,26
4	(Δ P _i / T _i)·10 ⁻²	4,5	8,9	8,9	60	20	30

Таблица 7. Дальнейший поиск неисправностей двигателя

№пп	Условные вероятности	Параметры				
		X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	P _{и1} (при x ₁ =1)	0,31	0,31	0,31	0,31	0,37
2	P _{и0} (при x ₁ =1)	0,69	0,69	0,56	0,48	0,63
3	Δ P _i (при x ₁ =1)	0,38	0,38	0,25	0,17	0,26
4	(Δ P _i / T _i)·10 ⁻²	7,9	7,9	125	85	130
5	P _{и1} (при x ₁ =0)	0,69	0,69	0,56	0,48	0,63
6	P _{и0} (при x ₁ =0)	0	0	0	0	0
7	Δ P _i (при x ₁ =0)	0,67	0,67	0,56	0,48	0,63
8	(Δ P _i / T _i)·10 ⁻²	15,6	15,6	280	240	335

Анализ данных таблицы 7 показывает последовательность поиска неисправностей в последующих двух элементах системы - масляном насосе и его редукционном клапане.

Проведя дальше такие расчеты до полного определения последовательности поиска неисправностей, можно установить, что поиск неисправности в системе смазки дизельного двигателя должен проводиться по следующей последовательности: «сопряжения коленчатого вала - масляный насос - редукционный клапан - перепускной клапан - секция фильтров - сливной клапан».

Усовершенствованная методика диагностирования с учетом методов, изложенных в пп 2 и 3 позволяет сократить трудоемкость и продолжительность работы по поиску неисправных агрегатов и их деталей дизельных двигателей техники, своевременно без разборки самой технической системы, далее заказать и поставить требуемое количество деталей для их замены.

Заключение

1. Снижение трудоемкости диагностирования достигается путем прекращения проверочных операций при появлении неисправностей в ресурсном

сопряжении, и поэтому последовательность контроля будет начинаться с одного из механизмов, имеющего ресурсные сопряжения. При этом минимальное значение энтропии будет в том случае, когда вероятности появления и отсутствия неисправностей будут близкими друг другу.

2. Установлено, что для получения максимальной информации на первом шагу проверки нужно начинать с этого элемента, у которого вероятности появления и отсутствия неисправностей наиболее близки. Так как обычно между элементами системы имеются связи, то кажущиеся вероятности появления неисправностей окажутся больше, чем вероят-

ность выхода из строя каждого элемента, определенных на основании статистических исследований. В качестве ценности информации принят критерий продолжительности разборки механизма, которая необходима для устранения неисправности ресурсного сопряжения и правильно отражает ценность получаемой информации.

3. Предложенная методика диагностирования позволяет сократить трудоемкость и продолжительность работы по поиску неисправных агрегатов и их деталей, своевременно без разборки машины обеспечить поставку нужного количества деталей службой материально-технического обеспечения для их замены.

Литература:

1. Ахмедзянов А.М., Тунаков А.П., Гумеров Х.С., Дегтяров Т.О. Параметрический метод диагностики: состояния авиационных двигателей по ограниченной информации. – М.: Авиационная техника, 1978; №3, С. 12-19.
2. Грузин В.В., Нуракова А.С. Управление сферой технического сервиса (на примере РГП «Казахавтодор»). Монография. – Караганда, Болашак-Баспа, 2007. – 170 с.
3. Грузин В.В., Нуракова А.С., Гривезирский Ю.В. Методика оптимизации технологического процесса диагностирования строительных и дорожных машин. Поиск. Серия естественных и технических наук, №2, – Астана: ЕНУ им. Л.Гумилева, 2006. С.260-262.
4. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования: Учебное пособие. – М.: Юнити-Дана, 2003. – 456 с.
5. Егоров И.В., Бобович П.А., Нуруллаев А.Т. Прогнозирование технического состояния турбомашин методами трендового анализа, // конверсия; в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2005. №4 5, С. 128 - 132.
6. Biopsy Techniques, Diagnostic Methods and Reporting. <https://basicmedicalkey.com/biopsy-techniques-diagnostic-methods-and-reporting/> [электронный ресурс, дата обращения: 30.06.2020].
7. Kalgonda A.A. On Multivariate Quality Control Techniques With Diagnostic. Lap Lambert Academic Publishing, 2012. – 156 с.
8. Mangey Ram, J. Paulo Davim. Diagnostic Techniques in Industrial Engineering. Springer, 2017. ISBN: 9783319654966, EAN: 9783319654966.
9. Stephen M. Rutner Maria Aviles Scott Cox. Logistics evolution: a comparison of military and commercial logistics thought. The International Journal of Logistics Management, 2012, Vol. 23 Iss 1, pp. 96 – 118.
10. Zoe Stanley-Lockman. Revisiting the Revolution in Military Logistics: Technological Enablers Twenty Years on. Disruptive and Game Changing Technologies in Modern Warfare Development, Use, and Proliferation, Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. 197 – 216.