



УДК 681.518.5

© 2018 г. **В.В. Воронин**, д-р техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ДЕФЕКТОВ

Рассматривается проблема эквивалентности на множестве возможных дефектов по отношению к множеству диагностических показателей. Описываются различные классы дефектов. Анализируется чувствительность диагностических показателей к элементам множества возможных дефектов. Фиксируются различные классы относительной эквивалентности дефектов с целью оценки достижимости заданного уровня эквивалентности.

Ключевые слова: множество возможных дефектов, отношение эквивалентности, диагностирование, классификация дефектов, диагностические показатели, чувствительность диагностических показателей к дефектам.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.60-69

Введение

В подавляющем большинстве известных методов поиска дефектов в качестве основной части исходных данных используется "множество заданных дефектов", элементы которого подлежат идентификации [1, 2]. Кроме того, во всех этих методах понятие дефекта является абстрактной сущностью – "модель дефекта" [3]. Для того чтобы данные методы имели практическую значимость, необходимо определить соответствие между модельными и реальными физическими дефектами. Практические примеры установления такого соответствия автору не известны.

В то же время, несмотря на рост сложности технических систем, практика поиска реальных физических дефектов остается достаточно успешной. Основу такого успеха составляют знания индивидуальных особенностей объекта диагностирования и условий его эксплуатации.

В этой ситуации логично предположить, что отправной точкой в технической диагностике должно стать не множество заданных модельных дефектов, а множество реально возможных дефектов. Если принять такую точку зрения, то

можно перечислить ряд направлений исследований в оригинальной формулировке, а именно: описание элементов множества возможных дефектов, исследование существенных отношений на множестве возможных дефектов, распределение элементов этого множества по структурным представлениям объекта диагностирования, анализ соответствия системы технического обслуживания данному объекту диагностирования и условиям его эксплуатации.

Важным типом существенных отношений на множестве возможных дефектов считаются отношения эквивалентности. Проблема эквивалентности дефектов на заданном их множестве частично затрагивается в работах [4, 5] и характеризуется в рамках данного класса объектов.

Постановка задачи

В работах по диагностическим приложениям недостаточно подробно характеризуются особенности элементов множества возможных дефектов и их классификация, кроме того, не уделяется должного внимания объективным отношениям на этом множестве. Основная задача данной работы – описать особенности элементов множества возможных дефектов, а также исследовать отношения эквивалентности на данном множестве, учитывая их относительный характер, а именно: эквивалентность по отношению к фиксированному множеству диагностических показателей.

Классификация дефектов

В самом общем случае под дефектом понимают недопустимое отклонение от нормы. В содержании термина «дефект» родовой признак – это «отклонение», которое определяет объективную сущность дефекта. Изменение не зависит от фиксирующего его субъекта. Видовой признак данного термина – «недопустимое», и «норма» определяет субъективную окраску. Кто-то устанавливает норму и определяет уровень отклонения, который считается недопустимым.

В общем случае термин «дефект» отражает и внешние, и внутренние свойства реальных объектов. В частности, в области контроля качества изделий принимают во внимание и внешние, и внутренние дефекты; в дефектологии дефект – это внутренний признак; в надежности дефект (отказ) – это внешнее явление.

В рамках управления надежностью технических объектов статус термина «дефект» связан с жизненным циклом объекта и с особенностями задач этапов этого цикла. Определим эксплуатационный дефект как такое изменение, имеющее пространственно-временную определенность в экземпляре объекта диагностирования (*ОД*), наличие которого ведет к невозможности дальнейшей его эксплуатации по техническим, безопасностным, экономическим или другим причи-

нам. С этапом проектирования связано понятие конструктивного дефекта. Этап производства в рассматриваемом отношении характеризуется технологическими дефектами.

Рассмотренные понятия эксплуатационных, конструктивных и технологических дефектов образуют классификацию понятия «дефект» по критерию «внешние причины дефекта».

Рассмотренные классы дефектов имеют смысл для любого технического объекта. Можно делить множество дефектов и по другим безотносительным к объекту основаниям. Такие основания предложим исходя из определения эксплуатационного дефекта. Поскольку дефект имеет пространственную определенность, т.е. принадлежит некоторой физической части объекта (блоку), то *ОД* следует рассматривать как систему.

Далее будем считать, что термин "дефект" имеет смысл только в рамках конструктивного представления *ОД*. В пределах функционального, иерархического и внешнего представлений ему соответствует термин "неисправность". Дефекты проявляются как неисправности. По системному признаку множество возможных дефектов делим на два класса: дефекты элементов *ОД* и дефекты связей между элементами (дефекты структуры).

Дефект элемента по отношению к его пространственной границе существует как внешнее либо как внутреннее явление. При этом элемент *ОД* в рамках конструктивного представления является либо простой (неделимой, невозстановливаемой), либо сложной (разборной, ремонтируемой) частью целого. Дефект структуры – всегда внешнее явление.

Характеристики временной определенности дефекта позволяют делить множество возможных дефектов также на два класса, а именно: устойчивые дефекты и неустойчивые дефекты.

Следующими безотносительными основаниями классификации эксплуатационных дефектов являются характер нормы и характер становления дефекта. Дефект как отклонение проявляется в изменении свойств(а) *ОД*. Количественные или качественные показатели этих свойств, выражаемые переменными величинами, будем называть *прямыми показателями дефектов (ПП)*. Недопустимую величину изменения *ПП* можно оценивать относительно трех разновидностей нормы: верхняя граница, нижняя граница и коридор значений. Если *ПП* нарушает верхнюю, нижнюю или границу коридора, то относится соответственно к классам прогрессивных, регрессивных или реверсивных дефектов.

Основание классификации – характер становления дефекта – следует понимать в двух отношениях. Это характер изменения *ПП* вообще (степень монотонности) и характер его изменения в момент нарушения нормы. Первое отношение характеризует «накопительные» процессы при эксплуатации *ОД* (непрерывность

III), второе – степень внезапности дефекта (разрывность III). В рамках этого основания дефекты делят на постепенные и внезапные.

Дефекты в различной степени влияют на функциональные процессы в *ОД*. Существуют дефекты, которые приводят к остановке или невозможности запуска этих процессов. Объект отказывается функционировать. Такие дефекты называют "отказами".

До сих пор мы анализировали чисто *технический* аспект термина "дефект" – различные недопустимые отклонения, объективно существующие в *ОД*. В практической деятельности поиска и устранения дефектов не менее важен *ситуационный* аспект этого термина.

Для объектов ремонтируемого класса при обнаружении дефектов наступает общее следствие – необходимость выполнить один из видов ремонтного воздействия. Материальные и трудовые затраты на поиск и ремонт (технологическая сложность дефекта) определяют экономические последствия дефекта. Технологическая сложность служит еще одним основанием для классификации дефектов.

Затраты на ремонт *ОД* в случае своевременного обнаружения дефекта – это как бы внутренние экономические последствия для системы технического обслуживания. Имеют важный смысл также ситуация, связанная с внешними последствиями как своевременно не обнаруженных, так и обнаруженных, но своевременно не устраненных дефектов.

Если дефект не обнаружен, то *ОД* при взаимодействии с эксплуатационной средой может причинить ей материальный, экологический, социальный или другой ущерб. По степени причиняемого ущерба дефекты будем классифицировать на дефекты, вызывающие безопасное неработоспособное состояние; дефекты, вызывающие опасное неработоспособное состояние; дефекты, вызывающие аварийное неработоспособное состояние. Ясно, что исправный объект не должен быть опасным для эксплуатационной среды.

Опасное или аварийное проявление необнаруженного дефекта влечет возможную юридическую ответственность, а в случае обнаруженного, но своевременно не устраненного дефекта такая ответственность, как правило, наступает с необходимостью.

Внешние последствия дефекта расширяют спектр возможных диагностических ситуаций. Например, в результате аварии возникает необходимость диагностирования поврежденных объектов с целью оценки ущерба на их восстановление. В катастрофических ситуациях возникает задача выявить причины катастрофы. Например, является ли техническое состояние пассажирского транспортного средства (какие именно дефекты) причиной катастрофы?

Рассмотренные выше разновидности ситуаций отнесем к технико-ситуационному типу – технический дефект по-разному проявляется в эксплуата-

ционной среде. Существует также чисто ситуационный аспект в термине "дефект" – причинами неработоспособного состояния *ОД* являются ошибки технического персонала или состояния эксплуатационной среды. При этом существует даже понятие поведенческого дефекта (размораживание системы отопления) и ситуационного дефекта (замерзание конденсата в газовых трубопроводах, неработоспособность автомобиля зимой при использовании летнего дизельного топлива).

Есть смысл различать также ситуационно-технический аспект термина "дефект" – в исправном *ОД* в результате аварийного воздействия на него со стороны других объектов появляются дефекты. Такие дефекты принято называть повреждениями.

Известно, что не существует абсолютно полной классификации определенного множества объектов. Поэтому можно предложить и другие основания для классификации. Например, в зависимости от того, является ли данный дефект следствием деградиционных процессов или нет, можно говорить о ресурсных и не ресурсных дефектах.

В таблице представлена классификация элементов множества возможных дефектов в технических объектах по рассмотренным выше основаниям.

По отношению к этапам жизненного цикла			
<i>Конструктивный P₁()</i>	<i>Технологический P₂()</i>	<i>Эксплуатационный P₃()</i>	
Характеристики временной определенности			
<i>Устойчивый P₄()</i>		<i>Неустойчивый P₅()</i>	
По системному признаку			
<i>Дефект элемента P₆()</i>	<i>Дефект связи P₇()</i>	<i>Комплексный P₈()</i>	
По отношению к пространственной границе объекта			
<i>Внешний P₉()</i>		<i>Внутренний P₁₀()</i>	
Характер нормы эксплуатационного дефекта			
<i>Прогрессивный P₁₁()</i>	<i>Регрессивный P₁₂()</i>	<i>Реверсивный P₁₃()</i>	
Характер становления дефекта			
<i>Постепенный P₁₄()</i>	<i>Внезапный P₁₅()</i>	<i>Комбинированный P₁₆()</i>	
Степень влияния на функциональные процессы			
<i>Наличие отказа P₁₇()</i>		<i>Отсутствие отказа P₁₈()</i>	
Доминирующий аспект			
<i>Технический P₁₉()</i>	<i>Технико-ситуационный P₂₀()</i>	<i>Ситуационно-технический P₂₁()</i>	<i>Ситуационный P₂₂()</i>
Технологическая сложность			
<i>Простые P₂₃()</i>		<i>Сложные P₂₄()</i>	
По отношению к границе жизненного цикла			
<i>Ресурсный P₂₅()</i>		<i>Нересурсный P₂₆()</i>	
Внешние последствия			
<i>Безопасный P₂₇()</i>	<i>Опасный P₂₈()</i>	<i>Аварийный P₂₉()</i>	
Физический род			
<i>Изменение параметра P₃₀()</i>	<i>Обрыв цепи P₃₁()</i>	<i>Трещина P₃₂()</i>	<i>Другие P_i()</i>

Каждый класс дефектов из таблицы имеет свои специфические особенности, выражающиеся в технологии их поиска. В общем случае множество возможных дефектов *неоднородно*, оно может включать дефекты всех перечисленных выше классов. Кроме того, данный дефект может удовлетворять различным критериям классификации. Например, устойчивый ресурсный дефект связи или неустойчивый технологически сложный дефект элемента.

Класс определенного дефекта предлагается описывать списком его классификационных свойств или конъюнкцией одноместных предикатов. Каждый предикат в такой конъюнкции имеет форму $P_i(d_j)$, где P_i – идентификатор индивидуального предиката (см. таблицу), d_j – идентификатор определенного дефекта.

Чувствительность диагностических показателей к соответствующим дефектам

Как уже отмечалось, каждый дефект определяется и может быть обнаружен своими прямыми показателями. Дефект и его *ПП* – характеристики конструктивного представления *ОД*.

Если по объективным (например, неразборный блок) или субъективным (например, высокая "стоимость" поиска по *ПП*) причинам затруднительно обнаружить дефект по его прямым показателям, то обычно есть возможность сделать это по показателям других структурных представлений. Такая возможность существует благодаря "*транзитным*" свойствам дефекта. Возникнув в одном месте, дефект может проявиться в других местах, вплоть до показателей внешнего представления.

Количественные или качественные показатели существенных свойств *ОД*, проявляемые на более высоких уровнях его системной организации по сравнению с уровнем данного дефекта, выражаемые переменными величинами, чувствительными к этому дефекту, называют *косвенными показателями* дефекта (*КП*). Косвенный показатель, как правило, чувствителен к нескольким дефектам. И, наоборот, дефект может проявляться в нескольких *КП*.

ПП или *КП*, используемые субъектом диагностической деятельности для решения диагностических задач, называют *диагностическими показателями* (*ДП*).

Что является элементами множества возможных дефектов? Это общепринятые в практике диагностирования идентификаторы дефектов (например, d_j), которым в общем случае взаимно однозначно соответствуют такие содержательные описания, фиксирующее *причины*, *характер* и *следствия* недопустимых изменения существенных свойств *ОД*, которые позволяют отличить данный дефект от всех других.

Под чувствительностью данного диагностического показателя к определенному подмножеству дефектов понимается такое изменение его значения, которое может быть зафиксировано в результате диагностической проверки и интерпретировано как факт наличия в *ОД* хотя бы одного дефекта из этого подмножества.

Формально чувствительность диагностических показателей к элементам множества возможных дефектов логично определить как бинарное отношение *F*, а именно:

$$F \subseteq S \times D,$$

где *S* – множество диагностических показателей; *D* – множество возможных дефектов.

Данное бинарное отношение можно задать в виде двухместного предиката *F(s, d)*, который интерпретируется как высказывание «диагностический показатель *s* чувствителен к дефекту *d*». При этом в множестве *S*×*D* выделяется подмножество пар $(s, d) \in S \times D$ таких, для которых высказывание *F(s, d)* истинно.

Предикат *F(s, d)* можно рассматривать как конечный, при этом конечность предметной области переменной *s* (множество *S*) не вызывает сомнений; конечность множества *D* в общем случае не очевидна. В этом случае воспользуемся искусственным приемом – введем в *D* в качестве его элемента подмножество неопределенных дефектов $\{d_\infty\}$. После этого предикат *F(s, d)* представим матрицей следующего вида.

	d_1	d_2	...	d_n	$\{d_\infty\}$	
s_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}	—	(1)
s_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2n}	—	
					—	
...			...		—	
					—	
s_m	r_{m1}	r_{m2}		r_{mn}	—	

В матрице чувствительности диагностических показателей к элементам множества возможных дефектов содержимое ячейки в *i*-й строке и в *j*-м столбце определяется выражением

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } s_i \text{ чувствителен к } d_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В последнем столбце матрицы значения в ячейках считаются неопределенными.

Если в двухместном предикате *F(s, d)* зафиксировать одну из переменных

определенным значением, то получим одноместный предикат. Например, предикат $F(s_2, d)$ характеризует множество дефектов, к которым чувствителен диагностический показатель s_2 , а одноместный предикат $F(s, d_2)$ описывает множество диагностических показателей, чувствительных к дефекту d_2 .

Относительная эквивалентность дефектов

Рассмотрим два крайних случая, когда предикат $F(s, d)$ тождественно истинен и тождественно ложен.

В обоих случаях все столбцы матрицы (1), кроме последнего, являются одинаковыми и неотличимы друг от друга. В диагностической интерпретации это означает, что все дефекты не различимы относительно данного множества диагностических показателей, а множество D будем называть *классом строго эквивалентных дефектов (КСЭД)* относительно данного множества S . И, как следствие, субъекту диагностической деятельности это множество S следовало бы изменить. Наглядно КСЭД можно иллюстрировать полным n -м двудольным графом.

Следующий особый случай – матрица (1) представляет собой диагональную форму, она квадратная и только по ее диагонали расположены единичные элементы. Это идеальная диагностическая ситуация, она реально возможна, когда каждый диагностический показатель является прямым показателем своего дефекта. В этом случае множество D будем называть *классом однозначно различимых дефектов (КОРД)* относительно данного множества S . Наглядно КОРД можно иллюстрировать биективным n -м двудольным графом.

КОРД моделируется не только диагональной матрицей. Необходимым и достаточным условием его существования следует считать попарную различимость столбцов матрицы (1). А такая различимость достижима только при выполнении следующего условия:

$$n \leq 2^m, \quad (2)$$

где n и m мощности соответственно множеств D и S .

Между КСЭД и КОРД возможны промежуточные варианты, характеризующие тем, что матрица (1) не удовлетворяет условию попарной различимости и в ней отсутствуют одинаковые столбцы. Тогда множество D будем называть *классом не строго эквивалентных дефектов (КНЭД)* относительно данного множества S .

В общем случае в матрице чувствительности могут присутствовать одновременно в качестве фрагментов все три описанные выше класса. При этом классов КСЭД и КНЭД может быть несколько (отсутствуют, имеют место один или более одного вариантов), а КОРД либо в одном варианте, либо отсутствует.

В этом смысле актуальна задача анализа матрицы (1) с целью выявления в

ней фрагментов относительной эквивалентности и приведения ее к виду с допустимым уровнем эквивалентности. Допустимый уровень эквивалентности логично формулировать в терминах классов эквивалентности. Очевидно, наивысший уровень – это *КОРД*, в других вариантах накладываются ограничения на допустимое количество *КСЭД* и *КНЭД*, а также на характеристики этих классов.

Возможности варьирования текущим уровнем эквивалентности связаны с двумя стратегиями, а именно: с изменениями наборов элементов и мощностей множеств *D* и *S*. В первом случае мы множество возможных дефектов вынужденно ограничиваем подмножеством заданных дефектов, снижая тем самым уровень объективности решаемых диагностических задач. Вторая стратегия – целенаправленное расширение множества диагностических показателей – имеет естественный практико-ориентированный характер, и она широко применяется в сочетании с экономическими соображениями [1].

Далее предлагается обобщенная процедура, реализующая вторую стратегию анализа относительной эквивалентности дефектов.

Шаг 1. Зафиксировать множество *D*.

Шаг 2. Задать допустимый уровень эквивалентности дефектов.

Шаг 3. Определить текущее множество *S*.

Шаг 4. Если соотношение (2) выполняется, то на *Шаг 5*, иначе *Шаг 3*.

Шаг 5. Выполнить процедуру «Сформировать матрицу (1)».

Шаг 6. Выполнить процедуру «Выявить *КОРД*».

Шаг 7. Если *КОРД* совпадает с матрицей (1), то на *Шаг 10*, иначе *Шаг 8*.

Шаг 8. Выполнить процедуры «Выявить *КСЭД*» и «Выявить *КНЭД*».

Шаг 9. Если заданный уровень эквивалентности достигнут, то *Шаг 10*, иначе *Шаг 3*.

Шаг 10. Фиксация классов относительной эквивалентности.

В данной процедуре анализ *КСЭД* и *КНЭД* совмещен в одной операции. В зависимости от формы задания допустимого уровня эквивалентности эту операцию можно разделить, организовав возврат на *Шаг 3* после анализа каждого класса в отдельности.

Заключение

В данной работе предложен сравнительно грубый механизм оценки относительной эквивалентности дефектов, включающий бинарные характеристики чувствительности диагностических показателей к соответствующим дефектам. Этот механизм в дальнейшем планируется совершенствовать, разбивая по возможности области значений количественных диагностических показателей на интерва-

лы и оценивая чувствительность интервалов к элементам множества возможных дефектов.

При таком подходе, однако, существует возможность остаться в рамках предикатной модели относительной эквивалентности дефектов, считая каждый интервал данного диагностического показателя новым показателем, итерационно расширяющим их множество.

Обеспечив требуемый уровень эквивалентности, далее при необходимости можно по матрице чувствительности, используя алгоритмы оптимального покрытия этой матрицы [2, 6], определить оптимальное множество диагностических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
2. Пархоменко П.П. Вопросы и организационные иерархии // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 163-174.
3. Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием параметрических функций чувствительности // Научный вестник НГТУ. – 2016. – №2 (63). – С. 23-34.
4. Спивак А.И., Цветков Л.В. Построение модели программного кода для обнаружения программных дефектов при помощи систем типов // Программные продукты и системы. – 2018. – № 1. – С. 152-157.
5. Ефанов В.Н., Китабов А.Н. Использование прецедентов в задаче выявления тренда параметров погружного электрооборудования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – № 9. – С. 39-45.
6. Закревский А. Д., Поттосин Ю. В., Черемисинова Л. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:

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