УДК 681.518.5

© 2003 г. **В.В. Воронин**, канд. техн. наук
(Хабаровский государственный технический университет)

ПРОДУКЦИОННЫЕ ПРАВИЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРОВЕРОК

В связи с технологией объектно-ориентированного подхода к разработке систем диагностирования исследуются особенности различных диагностических проверок. Приводится их классификация. Анализируется формальное описание нескольких классов проверок для логических блоков и их последовательного и параллельного соединений. Для описания используются системы четких и нечетких продукционных правил.

Введение

Чтобы удовлетворять современным функциональным требованиям и тенденциям, системы диагностирования должны разрабатываться на основе объектно-ориентированного подхода. Это предполагает использование библиотек диагностических блоков и их совокупностей. Методами диагностического блока как объекта определенного класса логично считать процедуры выполнения диагностических проверок. В данной работе анализируются особенности различных видов диагностических проверок.

Диагностическая проверка, далее просто проверка, – это комплекс технологических операций в процессе решения определенной диагностической задачи, выполняемых субъектом диагностической деятельности (*СДД*) в отношении объекта диагностирования (*ОД*). В такой технологической ситуации объект диагностирования или его часть логично называть объектом проверки.

Классификация диагностических проверок

Свой выбор проверок *СДД* делает из множества допустимых проверок. Это множество является результатом действия ограничений на более широкое множество – множество возможных проверок. К основным ограничениям относят доступность необходимых технических средств диагностирования и трудоемкость реализации проверок. Первый шаг в исследовании множества допустимых проверок естественно связать с описанием или классификацией множества возможных проверок.

Если проверка оценивает техническое состояние (*ТС)* одного диагностического блока (*ДБ)*, то будем называть ее простой, иначе – сложной; *A* = {*простая, сложная*}. Таким образом, объектом проверки может быть отдельный *ДБ*, определенная совокупность блоков или *ОД* в целом. Проверка считается простой тогда, когда объект проверки рассматривается как неделимое целое. В тех случаях, когда объект проверки – внешняя или внутренняя система, проверка считается сложной.

По виду результата проверки будем различать контрольные и диагностические проверки; *B* = {*контрольная, диагностическая*}. Результат контрольной проверки принадлежит двухэлементному множеству, например {*объект проверки исправен, объект проверки не исправен*}; результат диагностической проверки принадлежит к множеству возможных дефектов объекта проверки.

Технологические особенности проверок – следующее основание для разбиения множества возможных проверок на два подмножества. К первому подмножеству отнесем проверки, выполняемые заменой подозреваемого объекта проверки на заведомо исправный или его внедрение в заведомо исправный экземпляр *ОД*. Как правило, такие проверки являются простыми. Второе подмножество включает тестовые проверки. Технология тестовой проверки предполагает генерацию тестовых воздействий на объект проверки и фиксацию реакций объекта на эти воздействия; *C* = {*заменой, тестовая*}.

Если технология проверки предполагает использование технических средств диагностирования, то такую проверку будем относить к классу инструментальных проверок, иначе – к классу органолептических проверок; *D* = {*органолептическая, инструментальная*}.

Тестовые проверки характеризуются, во-первых, пространственным распределением точек подачи тестовых воздействий (входные точки) и точек фиксации реакций на них (контрольные точки); во-вторых, сложностью тестовых воздействий и реактивных сигналов. В первом отношении входная точка может являться внешним функциональным входом *ОД* или быть внутренней; аналогично контрольная точка может являться внешним функциональным выходом *ОД* или быть внутренней. Во втором отношении тестовые и реактивные сигналы делятся на бинарные и многозначные. Бинарные сигналы естественным или искусственным образом в каждый момент времени в данной проверке имеют одно из альтернативных значений (например, сигнал в наличии, сигнал отсутствует; сигнал в допуске, сигнал вне допуска). Многозначные сигналы за время статической проверки (см. ниже) также не изменяют своих значений, но при различных реализациях данной проверки их значения могут быть различными.

Видовое разнообразие тестовых проверок в рассмотренных отношениях иллюстрируется табл. 1. Здесь приняты следующие обозначения.

Пара (X,Y) обозначает видовые особенности тестового и реактивного сигналов в первом отношении, X соответствует тестовому сигналу, а Y – реактивному. Пара (x,y) обозначает видовые особенности во втором отношении. I,O – соответственно внешний вход и выход; K_i – i-й внутренний вход или выход; b,m – бинарный и многозначный вход или выход.

Таблица 1

	(I,O)	*(I,K$_i$)*	*(K$_i$,O)*	*(K$_i$,K$_j$)*
(b,b)				
(b,m)				
(m,b)				
(m,m)				

В табл. 1 первая ячейка с координатами ((I,O), (b,b)) соответствует контрольной проверке “*Наличие функционального процесса в диагностической цепи* (*ДЦ*)” – при допустимом (недопустимом) значении тестового сигнала на внешнем входе имеет место допустимое (недопустимое) значение реактивного сигнала на внешнем выходе. Следующие три ячейки ((I,K_i), (b,b)); ((K_i,O), (b,b)); ((K_i,K_j), (b,b)) представляют, соответственно три проверки: *“Наличие функционального процесса в начальной части ДЦ”, “Наличие функционального процесса в конечной части ДЦ”* и *“Наличие функционального процесса во внутренней части ДЦ”*.

Следующая строка табл. 1 характеризует контрольные проверки исправности или работоспособности. Ячейка с координатами ((I,O), (b,m)) есть проверка *“Исправность* (*работоспособность*) *диагностической цепи”* – при допустимом (недопустимом) внешнем тестовом сигнале фиксируется текущее установившееся значение внешней реакции, которое может быть сопоставлено с областью исправных (работоспособных) состояний или с областями неисправных (неработоспособных) состояний. Аналогично остальные три ячейки второй строки описывают соответственно исправность начальной, конечной и внутренней частей данной диагностической цепи.

Третья строка таблицы – это контрольные проверки *“Наличие функционального процесса в заданном режиме”* для диагностической цепи в целом и ее частей. Например, ((I,O), (m,b)) есть проверка “*Наличие функционального процесса в ДЦ*” для режима, соответствующего значению m тестового сигнала.

В последней строке представлены диагностические проверки. Для подозреваемого дефекта выбирается определенное значение тестового сигнала, а текущее значение реакции сравнивается с эталоном. Диагностическая проверка может быть выполнена как для диагностической цепи в целом – ((I,O), (m,m)), так и для ее частей (последние три ячейки).

Диагностические тестовые проверки в зависимости от учета инерционных особенностей *ОД* или его частей делят на статические и динамические проверки. Последние учитывают характер изменения во времени реактивного сигнала. Другими словами, в течение одной фиксированной проверки на одно или несколько значений тестового сигнала регистрируются несколько мгновенных значений реактивного сигнала.

Видовое многообразие проверок в приведенной классификации без учета структуры тестовых проверок определяется мощностью прямого произведения множеств $A = \{a_1, a_2\}$, $B = \{b_1, b_2\}$, $C = \{c_1, c_2\}$, $D = \{d_1, d_2\}$, $-|A \times B \times C \times D| = 16$.

Логические формы диагностических проверок

Процесс диагностирования по существу является реализацией определенной последовательности диагностических проверок. Эту последовательность принято называть алгоритмом диагностирования [1]. Задать алгоритм диагностирования – это определить множество проверок и отношение порядка на этом множестве. На практике алгоритмы диагностирования задаются и используются в различных формах. Форма может быть идеальной или материальной. В идеальном случае алгоритм существует в сознании *СДД*, который является опытным специалистом (экспертом) в области диагностирования технических объектов данного класса.

Различные степени автоматизации процессов диагностирования требуют использования различных материальных форм представления алгоритмов. Простейшая материальная форма – это программа диагностирования в виде инструкции или системы предписаний для *СДД*. Следующей формой являются автоматизированные или автоматические специализированные в отношении *ОД* технические средства диагностирования, в которых реализуется программа всего алгоритма или его части. Наиболее перспективной формой алгоритма диагностирования, сочетающей такие важные свойства как интеллектуальность и универсальность, считается экспертная система (*ЭС*).

При разработке большинства *ЭС* вполне сознательно делались усилия разделить систему на две части – машину вывода и базу знаний [2]. Идея состояла в том, что логический вывод является универсальной частью, а база знаний – специализированной. Эта идея выражает известный принцип независимости программ от данных. При разработке теории диагностических *ЭС*, очевидно, следует прояснить вопрос о том, каковы особенности универсальной и специализированной их частей.

Каждая проверка является посылкой для некоторого диагностического заключения, в противном случае проверка теряет логический смысл. Связи проверок и соответствующих диагностических заключений в базе знаний *ЭС* будем представлять в стандартной логической форме. Результат любой проверки является основанием некоторого диагностического вывода. Далее анализируются непосредственные выводы [3].

Логическую форму этих выводов будем строить в виде продукционного правила [1]:

$$\textit{если } R_i(a,b,c,d) = H_{ij}, \textit{ то } D_j, \qquad (1)$$

где $R_i(a,b,c,d)$ – результат i-й проверки вида (a,b,c,d); H_{ij} – j-е эталонное значение результата i-й проверки; D_j – диагностическое заключение для j-го эталонного значения.

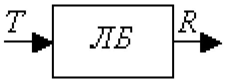

Рис. 1. Простейший диагностический блок.

Рассмотрим ряд вариантов формы (1). Простейший случай. Пусть объект проверки моделируется логическим блоком с одним входом (рис. 1). Эта ситуация в классификационной схеме проверок может соответствовать инструментальной, статической, простой, контрольной и тестовой проверке типа ((*I,0*), (*в,в*)). Детерминированную реализацию формы (1) естественно представить следующей парой правил:

если $T = 1$ *и* $R = 1$*, то* $D = 1$; (2)

если $T = 1$ *и* $R = 0$*, то* $D = 0$.

Первое правило в (2) формализует высказывание: если вход T объекта проверки в норме и его выход R также в норме, то объект является исправным; второе – если вход в норме, а выход не в норме, то объект неисправен.

Формально посылку в системе (2) можно дополнить еще двумя вариантами: ($T = 0$ и $R = 0$) и ($T = 0$ и $R = 1$), получив при этом третье и четвертое правила. Реальная возможность этих вариантов определяется физическими или конструктивными особенностями объекта проверки и тем, как интерпретируются логические константы 0 и 1.

Приведем два примера. Пусть логический блок (см. рис. 1) моделирует одноступенчатый редуктор и T – это движение входного вала, а R – движение выходного вала (рис. 2). Тогда первое правило в (2) можно интерпретировать следующим образом. Если входной вал повернуть на заданный угол $ц_1 = 1$ и при этом выходной вал повернется на соответствующий угол $ц_2 = 1$, то редуктор работоспособен; второе правило – если $ц_1 = 1$ и $ц_2 = 0$ (выходной вал повернулся на несоответствующий угол), то редуктор неисправен (срезало один или несколько зубьев). Если $ц_2 = 0$ интерпретируется как выходной вал не вращается (срезало шпонку ведущей или ведомой шестерен), то следствие логично сформулировать по-другому – редуктор не функционирует.

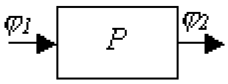

Рис. 2. Модель редуктора.

Как можно интерпретировать $ц_1 = 0$? Входной вал повернут на незаданный угол или входной вал не поворачивался? Первое высказывание лишено смысла. Подставим второе высказывание в третье правило: входной вал не поворачивался $ц_1 = 0$ и выходной вал не повернулся $ц_2 = 0$ и получим очевидную естественную ситуацию, которая не несет никакой диагностической информации и не влечет никакого следствия. Подставим это высказывание в четвертое правило: $ц_1 = 0$ и $ц_2 = 1$, получаем физически невозможную для данного объекта ситуацию.

В качестве второго примера рассмотрим клапан, управляемый би-

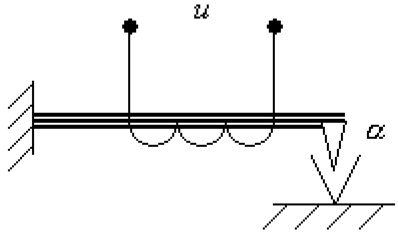

Рис. 3. Принципиальная схема клапана.

металлической пластиной с электрической спиралью (рис. 3). Определим логические константы следующим образом: u = 1 – подано номинальное напряжение на спираль; u = 0 – на спирали нет напряжения; α = 1 – клапан закрыт; α = 0 – клапан открыт. Первые три правила (соответственно с посылками (u = 1 и α = 1), (u = 1 и α = 0) и (u = 0 и α = 0)) имеют аналогичный с предыдущим примером смысл. Четвертое правило для данного объекта проверки обладает реальной физической возможностью, а именно:

если $u = 0$ *и* $\alpha = 1$*, то "заклинило иглу клапана в его седле".*

Эта проверка позволяет выявить конкретный дефект. Подобные дефекты относят к классу «константных» дефектов [1]. Правила (2) отражают лишь логические изменения технического состояния (*ТС)*, такие, которые проявляются на внешних выходах при известных входных воздействиях. При этом важно в каждом конкретном случае однозначно определить смысл логических констант.

Усложним ситуацию. Пусть объект проверки – простая диагностическая цепь, диагностические блоки которой моделируются логическими блоками (рис. 4).

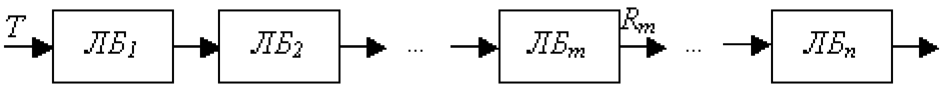

Рис. 4. Последовательное соединение логических блоков.

Тогда пара правил для детерминированной реализации формы (1) относительно заданной контрольной точки представима в следующем виде:

если $T = 1$ *и* $R_m = 1$, *то* $B_1 \,\&\, B_2 \,\&\, \ldots \,\&B_m$, (3)

если $T = 1$ *и* $R_m = 0$, *то* $\overline{B}_1 \vee \overline{B}_2 \vee \ldots \vee \overline{B}_m$,

где R_m – результат проверки в m-й контрольной точке; m – число блоков в *ДЦ* от точки приложения тестового воздействия до заданной контрольной точки; B_i, $\overline{B}_i$ – соответственно высказывания «i-й блок исправен» и «i-й блок неисправен». Возможное место в классификационной схеме: статическая, сложная, инструментальная, контрольная и тестовая проверка типа ((I,K_m), *(в,в))*. Если имеет место ситуация, описываемая первым правилом в (3), то это означает, что область поиска уменьшилась, а именно: область $X = \{1, 2, \ldots, m\}$ не имеет дефектов; область $Y = \{m+1, m = 2, \ldots, n\}$ требует дальнейших проверок. Истинность второго правила в (3) не уменьшает области поиска. Дефектные блоки могут принадлежать и X и Y. Требуется дальнейшая реализация проверок в областях X и Y. Первое правило в (3) сформулировано без учета явления компенсации сигналов. Заключение об исправности блоков проверяемого участка *ДЦ* может оказаться ложным из-за «противоположного» изменения *ТС* этих блоков. Исключить эффект компенсации можно дополнительными контрольными точками. Решение о назначении дополнительных контрольных точек принимается на основе анализа конструктивных и физических особенностей проверяемой *ДЦ*.

Возможность использования еще двух правил в системе (3) с посылками ($T = 0$ и $R_m = 0$) и ($T = 0$ и $R_m = 1$) также должна быть обоснована, исходя из анализа конструктивных и физических особенностей данной *ДЦ*.

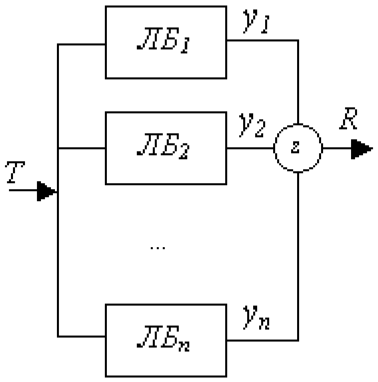

Рис. 5. Параллельное соединение логических блоков.

Рассмотрим объект проверки в виде сложной типовой *ДЦ*, схема которой приведена на рис. 5. Формулировка заключения проверки зависит от способа соединения сигналов y_i в точке z. Когда сигналы y_i преобразуются в сигнал R по правилу «*И*» (например, мощности четырех цилиндров ДВС объединяются на выходном валу), тогда правило проверки аналогичны форме (3), т.е.:

$$\text{если } T = 1 \text{ и } R = 1, \text{ то } B_1 \ \& \ B_2 \ \& \ldots \& B_n;$$
$$\text{если } T = 1 \text{ и } R = 0, \text{ то } B_1 \vee \overline{B}_2 \vee \ldots \vee \overline{B}_n. \quad (4)$$

Если же сигналы y_i объединяются по правилу *«ИЛИ»* (n-кратное нагруженное резервирование), то формальные правила изменяются и имеют следующий вид:

$$\text{если } T = 1 \text{ и } R = 1, \text{ то } B_1 \vee \overline{B}_2 \vee \ldots \vee \overline{B}_n;$$
$$\text{если } T = 1 \text{ и } R = 0, \text{ то } B_1 \ \& \ B_2 \ \& \ldots \& B_n. \quad (5)$$

Система (3) отличается от (4) тем, что, во-первых, в (4) поверка охватывает все блоки и, во-вторых, дальнейшая локализация в случае истинности второго правила в (4) имеет естественную последовательность. Эта последовательность предполагает поочередное отключение блоков и фиксацию изменения реакции R. Если при отключении $ЛБ_i$ R изменяется, то этот блок считается исправным, в противном случае – неисправным. Если, например, отключить высоковольтный провод от свечи зажигания в ДВС и при этом обороты двигателя ощутимо уменьшатся, то свеча и соответствующий ей цилиндр работоспособны.

В системе (5) истинность первого правила говорит о том, что хотя бы один блок исправен. Если требуется проверка всех блоков, то следует их все отключить, а затем последовательно поочередно включать. На i-м шаге истинность первого правила в (5) свидетельствуют об исправности $ЛБ_i$; ложность – о неисправности.

В сложных *ДЦ*, имеющих параллельные взаимодействующие каналы, возможны дефекты особого типа. Их особенность заключается в том, что они нарушают временные отношения на множестве функциональных сигналов. Другими словами, они нарушают синхронизацию взаимодействующих процессов. Как правило, устранение таких дефектов осуществляется предусмотренными регулировками. Для обнаружения асинхронности *ЭС* должна включать правила для специальных проверок:

если $T = 1$ *и* $\forall\ i,\ y_i(t) = y_i(t_c)$, *то ДЦ синхронизирована*;

если $T = 1$ *и* $\forall .i,\ y_i(t) \neq y_i(t_c)$, *то ДЦ не синхронизирована.*

Здесь $y_i(t_c)$– требуемое значение сигнала в i-м канале в момент t_c синхронизации (например, в момент появления стробирующего импульса).

Частный случай учета временных отношений на множестве функциональных процессов реализуется в инерционных поверках. Правила для этих проверок имеют следующий вид:

если $T = 1$ *и* $R(t_c) = 1$, *то* $D = 1$,

если $T = 1$ *и* $R(t_c) = 0$, *то* $D = 0$,

где $R(t_c)$ – реакция объекта проверки на тестовое воздействие в заданный момент времени. Примером инерционной проверки служит проверка клапана дополнительной подачи воздуха в системе впрыска *ДВС* [4]. Эта проверка заключается в подаче напряжения на спираль и ожидании окончания заданного временного интервала с последующей фиксацией факта закрытия клапана.

Далее логический блок и простая *ДЦ* исследуются на возможность применения к ним аппарата лингвистических переменных. Существуют достаточно чtткие области процесса изменения *ТС*, где классификация состояний выполняется однозначно. Например, область, близкая к идеальному состоянию канала в системе охлаждения ДВС, и область, близкая к полному загрязнению (закупориванию канала). Если процесс непрерывен и монотонен, то граница между этими областями нечеткая. Непрерывность и монотонность – характерные свойства деградационных процессов Удобным средством формального описания таких процессов является аппарат лингвистических переменных, в основе которого лежит понятие нечетного множества [5, 6]. Это понятие на примере прямого показателя *б* фиксированного дефекта иллюстрируется на рис. 6. Функция принадлежности *м*(*б*) задает некоторую степень уверенности в диапазоне [0, 1] в том, что при известном значении *б* данный дефект имеет место в данном объекте проверки. В общем случае функция принадлежности может зависеть от времени, т.е. *м*(*б,t*) как бы адаптируется к этапам жизненного цикла *ОД*.

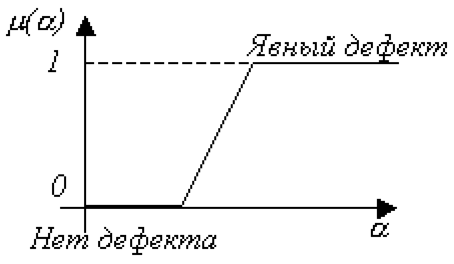

Рис. 6. Нечеткая модель дефекта.

Использование лингвистических переменных существенно расширяет возможности моделирования диагностических проверок в сравнении с логическими переменными. Пусть результат проверки *R* и диагноз *D* для простейшего случая (см. рис. 1) являются лингвистическими переменными. Тогда форма (1) может быть выражена системой нечетких продукционных правил.

$П_1$. Если T = 1 и R есть A_1, то D есть B_1.
$П_2$. Если T = 1 и R есть A_2, то D есть B_2, ... (6)
$П_n$. Если T = 1 и R есть A_n, то D есть B_n,
где A_i и B_i – нечеткие множества (значения соответственно лингвистических переменных R и D); n – число термов переменных R и D. Например, для $n = 4$ возможна следующая интерпретация системы правил (6):
$П_1$. Если T = 1 и R есть «высокий уровень», то «идеальное ТС».
$П_2$. Если T = 1 и R есть «близко к высокому уровню», то «нормальное ТС».
$П_3$. Если T = 1 и R есть «средний уровень», то «удовлетворительное ТС».
$П_4$. Если T = 1 и R есть «близко к нулевому уровню», то «неисправное ТС».

Форма (6) имеет более широкие потенциальные возможности для представления многочисленных особенностей диагностических проверок в сравнении с (2). Нечеткие системы продукционных правил (6) имеют две гибридные разновидности. Первая разновидность характеризуется нечеткостью посылки и четкостью заключения. Например:
$П_1$. Если T = 1 и R есть «высокий уровень», то D = 1.
$П_2$. Если T = 1 и R есть «близко к высокому уровню», то D = 1.
$П_3$. Если T = 1 и R есть «средний уровень», то D = 1.
$П_4$. Если T = 1 и R есть «близко к нулевому уровню», то D = 0.

Вторая разновидность, наоборот, имеет четкую посылку и нечеткое заключение:
если T = 1 и R = 1, то «идеальное» или «нормальное» или «удовлетворительное» ТС;
если T = 1 и R = 1, то «неисправное» ТС.

Система (6) может считаться также гибридной постольку, поскольку первый элемент посылки (T = 1) есть четкое соотношение. Подобная однородная система, в которой и тестовое воздействие задается в нечеткой форме, будет включать правила следующего вида:
$П_i$. Если T есть C_i и R есть A_i, то D есть B_i. (7)

Приведем пример правила в форме (7). Если момент, приложенный в вертикальной плоскости к переднему колесу легкового автомобиля *около* 50 *кгм* и при этом *явно ощущается* наличие зазора, то шаровая опора *очевидно неисправна*. Ясно, что система правил в форме (7) потенциально описывает более широкий спектр возможных диагностических ситуаций в сравнении с формой (6). Например, при проверке электропневматического клапана с биметаллической пластиной (см. рис. 3) тестовое воздействие – это номинальное напряжение на спирали (T=12 *В*); однако в диагностической практике тестовое воздействие может иметь ряд градаций $T \in$(*«выше номинального», «около номинального», «ниже номинального»*).

Заключение

Использование лингвистических переменных для моделирования проверок в диагностических цепях, как и при моделировании проверок отдельных блоков, существенно расширяет возможности описания диагностических ситуаций.

Если в системе (3) T и R_m есть лингвистические переменные и мощности множеств их значений соответственно есть $/\{t_i\}/ = n$ и $/\{r_i\}/ = k$, то число формально возможных посылок в правилах определится как $n \times k$ (в (3) имеет $2 \times 2 = 4$ возможной посылки). Конечно, не каждая из этих формальных посылок должна обязательно иметь реальную практическую ценность. Заменим далее каждую логическую переменную B_i в (3) на соответствующую лингвистическую переменную, значения которой есть имена возможных дефектов i-го блока *ДЦ* и имя исправного *ТС* этого блока. После этого получим однородную нечеткую систему правил для локализации возможных дефектов в *ДЦ* (см. рис. 4). Необходимым формальным условием различения любого кратного дефекта в *ДЦ* относительно данной системы правил будет соотношение

$$n \times k \geq /\{d_1\}/ \times /\{d_2\}/ \times \ldots \times /\{d_m\}/,$$

где $\{d_i\}$ – множество значений переменной B_i или множество возможных дефектов i-го блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. М.: Машиностроение, 1987. Т.9. Техническая диагностика /Под общ. ред. *В.В. Клюева, П.П. Пархоменко.*
2. Экспертные системы. Принципы работы и примеры /Под ред. *Р. Форсайта*. М.: Радио и связь, 1987.
3. *Чупахин И.Я., Плотников А.М., Сергеев К.А. и др*. Формальная логика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.
4. *Соснин Д.А*. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных бортовых автомобилей. М: СОЛОН-Р, 2001.
5. *Осис Я.Я.* Распознавание неисправностей сложных объектов диагностики с использованием теории размытых множеств. //Кибернетика и диагностика. 2. Рига: Зинатне, 1968. С. 13-17.
6. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М: Мир, 1976.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.