

Задачи построения алгоритмов поиска неисправностей аналоговых промышленных объектов

А.В. Емашов

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
iyemashov@gmail.com

Статья поступила 15.10.2016, 29.11.2016

В статье рассматриваются задачи построения алгоритмов поиска неисправностей аналоговых промышленных объектов. Оперативный поиск неисправностей на основе оптимальных алгоритмов сокращает время неработоспособности диагностируемого объекта и снижает риск останова производственной линии. Приведена классификация средств диагностирования, рассмотрены алгоритмы диагностирования реальных промышленных объектов и вопросы их оптимизации. Для решения одной и той же задачи диагностирования можно разработать несколько алгоритмов, различающихся либо составом проверок, либо последовательностью их реализации. Рассмотрены функциональные и структурные модели промышленных объектов, а также методы выбора очередности проверок, применимые на практике. Описаны наиболее значимые параметры для поиска неисправностей оборудования промышленных объектов. Построен произвольный алгоритм поиска неисправностей технического объекта на примере многопараметрического преобразователя Rosemount 3095MV, составлена диагностическая таблица связей неисправностей и признаков их проявления, получены всевозможные пересечения проверок. Построен древовидный граф алгоритма поиска неисправностей. Рассчитана цена обхода данного графа применительно к многопараметрическому преобразователю Rosemount 3095MV. Как показал опыт внедрения разработанных алгоритмов диагностирования в филиале Группы «Илим» и на ТЭЦ-6 в Братске, они могут быть дополнены или изменены в процессе применения на практике.

Ключевые слова: алгоритм поиска неисправностей; промышленный объект; средства диагностирования; диагностическая таблица.

Tasks of designing algorithms for searching failures of analog industrial objects

A.V. Emashov

Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
iyemashov@gmail.com

Received 15.10.2016, accepted 29.11.2016

The article deals with the problem of designing search algorithms of analogue industrial objects failures on the example of multivariable mass flow transmitter Rosemount 3095MV. Quick search of failures with the help of optimal algorithms makes it possible to reduce both an unavailable period of the diagnosed object and the risk of shutdown of the production line. The classification of diagnostic devices is given. The diagnostic algorithms of real industrial objects and their optimization are considered. It is possible to develop several algorithms differing in either the composition of checks, or the sequence of their implementation. The functional and structural models of industrial objects are considered. The methods for selecting a sequence of practical checks are developed. The most significant parameters for the search of equipment failures of industrial objects are described. The arbitrary search algorithm of failures of a technical object on the example of multivariable mass flow transmitter Rosemount 3095MV is designed. The diagnostic table of failure links and signs of their manifestation is created. All the possible check crossings are obtained. The tree graph of the search algorithm of failures is constructed. The price of bypass of the tree graph of the search algorithm of failures as applied to multivariable mass flow transmitter Rosemount 3095MV is calculated. The direct implementation of engineering design in the Branch of Ilim Group and Heat Electropower Station – 6 showed that the developed diagnostic algorithms can be supplemented or changed during their practical application.

Keywords: failure search algorithm; industrial object; diagnostics tools; diagnostic table.

Введение

Комплексный подход к решению вопросов диагностирования промышленных объектов предусматривает техническое обслуживание оборудования специалистами по контрольно-измерительным приборам и автоматике, а также автоматизированный способ определения состояния объектов автоматике с помощью средств встроенного или надстраиваемого контроля. Зачастую это позволяет избежать возникновения отказов, однако

полностью предотвратить их все-таки не удается. В таких случаях возникает проблема минимизации временных затрат на поиск и устранение возникшей неисправности или, иными словами, задача формирования оптимальных алгоритмов поиска неисправностей [1].

Постановка задачи. Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют систему диагностирования.

Система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует алгоритм диагностирования [2].

Каждая проверка определяется тестовым или рабочим воздействием, подаваемым или поступающим на объект, и составом контрольных точек, с которых снимается информация о состоянии объекта.

Результатом проверки являются конкретные значения выходных сигналов объекта в соответствующих контрольных точках.

Диагноз ставится по результатам анализа полученных результатов проверок [3].

Построение алгоритмов диагностирования заключается в выборе такой совокупности проверок, по результатам которых в задачах обнаружения неисправностей можно отличить исправное или работоспособное состояние, или состояние правильного функционирования объекта, от его неисправных состояний [4].

Для решения одной и той же задачи диагностирования (например, проверки исправности) можно построить несколько алгоритмов, различающихся составом проверок и последовательностью их реализации. Поэтому возникает проблема синтеза оптимальных алгоритмов по времени и стоимости их реализации.

Для построения алгоритмов диагностирования формализованными методами необходимы данные, которые можно получить путем анализа моделей объектов. Кроме того, модели объектов используются для формализованного анализа алгоритмов диагностирования на полноту обнаружения и глубину поиска неисправностей [5].

Модели бывают функциональные и структурные. Функциональные модели позволяют решать задачи проверки правильности функционирования объекта (они отражают только выполняемые объектом функции, определенные относительно рабочих входов и рабочих выходов объекта). Структурные модели обеспечивают возможность проверки исправности и поиска неисправностей на глубину структурного параметра [6].

Под алгоритмом поиска неисправностей в общем случае понимается последовательность проверок, предназначенная для определения отказавшей структурной единицы, т. е. решается задача идентификации [7]. Если все проверки позволяют идентифицировать любую появившуюся неисправность, то говорят, что решается задача полной идентификации, в противном случае речь идет о задаче неполной идентификации.

Алгоритм поиска неисправности может предусматривать полную проверку всех элементов структуры технического объекта или же, при нахождении неисправности в каком-либо элементе, возможность прекращения поиска, т. е. алгоритм поиска неисправности может носить безусловный или условный характер [8].

В общем случае построение алгоритма поиска неисправностей ведется в следующей последовательности [9]:

- изучение объекта диагностирования;
- формирование таблицы связей неисправных состояний и признаков неисправных состояний;
- формирование списка всех неповторяющихся ситуаций для рассматриваемого объекта диагностирования;
- построение графа поиска неисправностей и расчет цены его обхода.

Изучение объекта технической диагностики начинают с изучения конструкции, принципа действия, ос-

новных технических данных и условий его работоспособности. Затем изучается эксплуатационная технологичность конструкции, т. е. приспособленность к проведению работ по технической диагностике и восстановлению поврежденных элементов. Особое внимание уделяется контролепригодности объекта, т. е. количеству и составу измеряемых параметров, их информативности, точности результатов измерений и т. д. Формирование таблицы связей неисправных состояний и признаков этих состояний производится на основе изучения статистических данных и результатов специальных исследований отказов и неисправностей объекта. При этом отбираются только наиболее существенные, часто повторяющиеся и влияющие на безотказность объекта неисправности, а также признаки (проверки), различающие конкретные ситуации неисправности объекта. При отборе данных необходимо учитывать условия проведения диагностических работ, а также технические возможности имеющихся в наличии средств контроля. Время и трудоемкость поиска во многом зависят от правильности выбора состава и очередности проверок. Оптимальный алгоритм технической диагностики должен обеспечивать выявление неисправности при минимальном числе проверок и времени поиска в условиях создавшейся ситуации [10].

На практике нашли применение следующие методы выбора очередности проверок:

- по убывающей частоте появления неисправностей (проверка слабых точек). При этом очередность проверок устанавливается с учетом вероятности появления неисправных состояний;

- по возрастающему времени проверок (от простого к сложному). Очередность проверок в этом случае устанавливается с учетом трудоемкости (времени) выполнения проверок;

- по возрастающему значению показателя Π (частоты появления — времени проверок), рассчитанному по формуле $\Pi_i = t_i / P_i$. Очередность проверок определяется в соответствии со значением Π_i . В условиях ограниченного резерва времени (оперативное техническое обслуживание) практически удается реализовать только часть общего алгоритма поиска, содержащую проверку по наиболее вероятным и доступным для технической диагностики неисправностям [11].

Наиболее значимыми параметрами для поиска неисправностей являются условные вероятности возникновения отказов (p_i) и время на поиск отказов (t_i). Под условной вероятностью возникновения отказов p_i понимается вероятность того, что отказ произошел в i -м структурном элементе отказавшего технического объекта. Другими словами, объект уже отказал, и с вероятностью p_i отказ возник в i -м структурном элементе. Время поиска отказа t_i — это время локализации неисправности в i -м структурном элементе [12].

Зная исходные данные p_i и t_i , на первом этапе построения алгоритма поиска неисправностей составляется диагностическая модель технического объекта, или таблица неисправностей [13].

Метод решения. Построим произвольный алгоритм поиска неисправностей для многопараметрического преобразователя Rosemount 3095MV, входящего в состав технологической линии ТЭЦ-6.

Процесс построения алгоритма поиска неисправностей иллюстрируется древовидным графом, на котором видна вся последовательность действий по идентификации событий отказов структурных единиц технического объекта [14].

Для начала составим диагностическую таблицу связей (ТС) для данного технического объекта. Диагностическая ТС — это таблица, в которой указывается связь между неисправностями и признаками их проявления. ТС размерностью 14×27 изображена частично (табл. 1). В ТС использованы следующие обозначения: S_k — признаки неисправности, которым соответствуют вероятности их появления $P(S_k)$; $П_k$ — названия проверок, которым соответствует время их проведения $C(S_k)$.

Признаку «S3» (значения переменных процесса занижены или показания отсутствуют) соответствует одна из трех неисправностей (П1 — наличие замыканий, разомкнутых цепей и нескольких точек заземления; П3 — напряжение питания преобразователя находится за пределами диапазона 11–55 В; П5 — некорректные значения тока, потребляемого всеми преобразователями, подключенными к данному источнику питания); признаку «S4» (ошибочные показания переменной процесса) соответствуют следующие неисправности:

П3 — напряжение питания преобразователя находится за пределами диапазона 11–55 В, П4 — избыточная пульсация переменных процесса; признаку «S1» (дифференциальное давление ниже нижней границы диапазона) соответствует П2 — преобразователь находится под недостаточным давлением; признаку «S6» соответствует П6 (активировано моделирование) и признаку «S7» — неисправность П7 (плохой контакт соединения дисплея).

Для определения ситуаций исходного множества неисправностей необходимо найти все возможные пересечения проверок (табл. 2).

Пусть первой будет проверка П3. Проведя ее, мы разделим все признаки неисправностей на две группы — обнаруживаемые {S2,S3,S4,S5} и не обнаруживаемые проверкой П3, {S1,S6,S7}. Таким образом, мы сузим область поиска неисправностей до четырех конкретно взятых структурных единиц — в случае положительного исхода проверки П3 и до трех — в случае отрицательного исхода.

Таблица 1

Фрагмент исходной таблицы связей неисправностей и признаков их проявления

	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	$P(S_k)$
S1	0	1	0	0	0	0	0	0,47
S2	0	0	1	0	0	0	0	0,12
S3	1	0	1	0	1	0	0	0,19
S4	0	0	1	1	0	0	0	0,11
S5	0	0	1	0	1	0	0	0,05
S6	0	0	0	0	0	1	0	0,02
S7	0	0	0	0	0	0	1	0,04
$C(S_k)$	40	35	15	20	30	10	5	

Таблица 2

Пересечения проверок

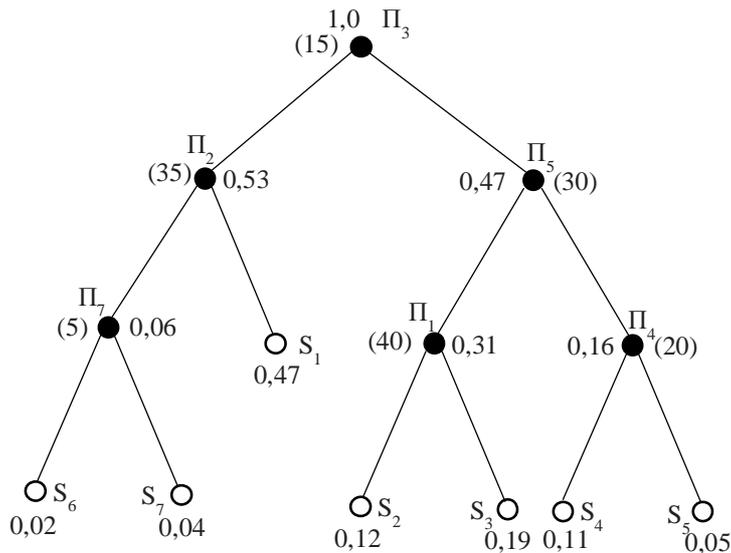
1	2
П1: {S3}, {S1,S2,S4,S5,S6,S7}	П3&П4: {S2,S3,S5}, {S4}, {S1,S6,S7}
П2: {S1}, {S2,S3,S4,S5,S6,S7}	П3&П5: {S3,S5}, {S2,S4}, {S1,S6,S7}
П3: {S2,S3,S4,S5}, {S1,S6,S7}	П3&П6: {S2,S3,S4,S5}, {S6}, {S1,S7}
П4: {S4}, {S1,S2,S3,S5,S6,S7}	П3&П7: {S2,S3,S4,S5}, {S7}, {S1,S6}
П5: {S3,S5}, {S1,S2,S4,S6,S7}	П4&П5: {S3,S5}, {S4}, {S1,S2,S6,S7}
П6: {S6}, {S1,S2,S3,S4,S5,S7}	П4&П6: {S4}, {S6}, {S1,S2,S3,S5,S7}
П7: {S7}, {S1,S2,S3,S4,S5,S6}	П4&П7: {S4}, {S7}, {S1,S2,S3,S5,S6}
П1&П2: {S1}, {S3}, {S2,S4,S5,S6,S7}	П5&П6: {S3,S5}, {S6}, {S1,S2,S4,S7}
П1&П3: {S2,S4,S5}, {S3}, {S1,S6,S7}	П5&П7: {S3,S5}, {S7}, {S1,S2,S4,S6}
П1&П4: {S3}, {S4}, {S1,S2,S5,S6,S7}	П6&П7: {S6}, {S7}, {S1,S2,S3,S4,S5}
П1&П5: {S3}, {S5}, {S1,S2,S4,S6,S7}	П1&П2&П3: {S1}, {S2,S4,S5}, {S3}, {S6,S7}
П1&П6: {S3}, {S6}, {S1,S2,S4,S5,S7}	П1&П2&П4: {S1}, {S3}, {S4}, {S2,S5,S6,S7}
П1&П7: {S3}, {S7}, {S1,S2,S4,S5,S6}	П1&П2&П5: {S1}, {S3}, {S5}, {S2,S4,S6,S7}
П2&П3: {S1}, {S2,S3,S4,S5}, {S6,S7}	П1&П2&П6: {S1}, {S3}, {S6}, {S2,S4,S5,S7}
П2&П4: {S1}, {S4}, {S2,S3,S5,S6,S7}	
П2&П5: {S1}, {S3,S5}, {S2,S4,S6,S7}	П1&П2&П7: {S1}, {S3}, {S7}, {S2,S4,S5,S6}
П2&П6: {S1}, {S6}, {S2,S3,S4,S5,S7}	
П2&П7: {S1}, {S7}, {S2,S3,S4,S5,S6}	П1&П3&П4: {S3}, {S2,S5}, {S4}, {S1,S6,S7}
	П1&П3&П5: {S2,S4}, {S3}, {S5}, {S1,S6,S7}
	П1&П3&П6: {S3}, {S2,S4,S5}, {S6}, {S1,S7}

1	2
П1&П3&П7: {S3}, {S2,S4,S5}, {S7}, {S1,S6} П1&П4&П5: {S3}, {S4}, {S5}, {S1,S2,S6,S7} П1&П4&П6: {S3}, {S4}, {S6}, {S1,S2,S5,S7} П1&П4&П7: {S3}, {S4}, {S7}, {S1,S2,S5,S6} П1&П5&П6: {S3}, {S5}, {S6}, {S1,S2,S4,S7} П1&П5&П7: {S3}, {S5}, {S7}, {S1,S2,S4,S6} П1&П6&П7: {S3}, {S6}, {S7}, {S1,S2,S4,S5} П2&П3&П4: {S1}, {S2,S3,S5}, {S4}, {S6,S7} П2&П3&П5: {S1}, {S2,S4}, {S3,S5}, {S6,S7} П2&П3&П6= П2&П3&П7: {S2,S3,S4,S5}, {S1}, {S6}, {S7} П2&П4&П5: {S1}, {S3,S5}, {S6}, {S2,S4,S7} П2&П4&П6: {S1}, {S4}, {S6}, {S2,S3,S5,S7} П2&П4&П7: {S1}, {S4}, {S7}, {S2,S3,S5,S6} П2&П5&П6: {S1}, {S3,S5}, {S6}, {S2,S4,S7} П2&П5&П7: {S1}, {S3,S5}, {S7}, {S2,S4,S6} П2&П6&П7: {S1}, {S6}, {S7}, {S2,S3,S4,S5} П3&П4&П5: {S2}, {S3,S5}, {S4}, {S1,S6,S7} П3&П4&П6: {S2,S3,S5}, {S4}, {S6}, {S1,S7} П3&П4&П7: {S2,S3,S5}, {S4}, {S7}, {S1,S6} П3&П5&П6: {S2,S4}, {S3,S5}, {S6}, {S1,S7} П3&П5&П7: {S2,S4}, {S3,S5}, {S7}, {S1,S6} П3&П6&П7: {S2,S3,S4,S5}, {S6}, {S7}, {S1} П4&П5&П6: {S3,S5}, {S4}, {S6}, {S1,S2,S7} П4&П5&П7: {S3,S5}, {S4}, {S7}, {S1,S2,S6} П4&П6&П7: {S4}, {S6}, {S7}, {S1,S2,S3,S5}	П5&П6&П7: {S3,S5}, {S6}, {S7}, {S1,S2,S4} П1&П2&П3&П4: {S1}, {S3}, {S4}, {S2,S5}, {S6}, {S7} П1&П2&П3&П5: {S1}, {S2,S4}, {S3}, {S5}, {S6}, {S7} П1&П2&П3&П6: {S1}, {S2,S4,S5}, {S3}, {S6}, {S7} П1&П2&П3&П7: {S1}, {S2,S4,S5}, {S3}, {S7}, {S6} П2&П3&П4&П5: {S1}, {S3,S5}, {S2}, {S4}, {S6,S7} П2&П3&П4&П6: {S1}, {S2,S3,S5}, {S4}, {S6}, {S7} П2&П3&П4&П7: {S1}, {S2,S3,S5}, {S4}, {S7}, {S6} П3&П4&П5&П6: {S2}, {S3,S5}, {S4}, {S6}, {S1,S7} П3&П4&П5&П7: {S2}, {S3,S5}, {S4}, {S7}, {S1,S6} П4&П5&П6&П7: {S3,S5}, {S4}, {S6}, {S7}, {S1,S2} П1&П2&П3&П4&П5: {S1}, {S2}, {S3}, {S4}, {S5}, {S6,S7} П1&П2&П3&П4&П6: {S1}, {S2,S5}, {S3}, {S4}, {S6}, {S7} П1&П2&П3&П4&П7: {S1}, {S2,S5}, {S3}, {S4}, {S7}, {S6} П2&П3&П4&П5&П6= П2&П3&П4&П5&П7= П2&П3&П4&П5&П6&П7: {S1}, {S2}, {S3,S5}, {S4}, {S6}, {S7} П3&П4&П5&П6&П7: {S2}, {S3,S5}, {S4}, {S6}, {S7}, {S1} П1&П2&П3&П4&П5&П6= П1&П2&П3&П4&П5&П7= П1&П2&П3&П4&П5&П6&П7: {S1}, {S2}, {S3}, {S4}, {S5}, {S6}, {S7}

Проводя проверку П2 на подмножестве трех событий {S1,S6,S7}, разделяем события {S6,S7} и {S1}, после чего требуется разделить между собой только два события — {S6,S7}. Данную задачу можно решить постановкой проверки П7.

Дальнейшее выполнение проверки П5 на подмножестве {S2,S3,S4,S5} позволяет разделить между собой

подмножества {S2,S3} и {S4,S5}. Для разделения подмножества {S2,S3} можно поставить проверку П1, а для {S4,S5} — П4. Рисунок иллюстрирует процесс поиска неисправностей, характеризующийся древовидным графом.



Алгоритм поиска неисправностей

На рисунке черными кружками обозначены неисправности, белыми — признаки неисправностей. Рядом с признаками подписаны условные вероятности неисправностей, а рядом с проверками, цифрами в скобках,

— время, затрачиваемое на проверки (или цена проверок), а также вес проверок (для *i*-й проверки они получены как сумма весов идентифицируемых признаков неисправностей по всем исходам данной проверки) в

виде цифр без скобок. Таким образом, на рисунке изображен древовидный граф, в котором движение ведется от вершины ПЗ к любой из висячих вершин S_i (т. е. граф ориентированный). Кроме того, поскольку каждой вершине графа присвоен некоторый вес, граф является к тому же и взвешенным.

Наличие параметров веса и цен вершин позволяет оценить граф, приведенный на рисунке, по критерию среднего времени, затрачиваемого на идентификацию всех событий. Данный параметр называется ценой обхода алгоритма поиска неисправностей C .

Чем ниже цена обхода, тем быстрее в среднем идентифицируются все события отказов в построенном алгоритме их поиска [15].

Цена обхода вычисляется по следующей формуле [16]:

$$C = \sum_{i=1}^n P(S_i)C(S_i),$$

где n — число проверок; $P(S_i)$ — вес проверки, равный сумме весов ее исходов; $C(S_i)$ — цена проверки (время поиска неисправности).

Рассчитаем с использованием данной формулы цену обхода дерева, изображенного на рисунке:

$$\begin{aligned} C &= P(\Pi_3)C(\Pi_3) + P(\Pi_2)C(\Pi_2) + P(\Pi_7)C(\Pi_7) + \\ &+ P(\Pi_5)C(\Pi_5) + P(\Pi_1)C(\Pi_1) + P(\Pi_4)C(\Pi_4) = \\ &= 1,00 \cdot 15 + 0,53 \cdot 35 + 0,06 \cdot 5 + 0,47 \cdot 30 + 0,31 \cdot 40 + \\ &+ 0,16 \cdot 20 = 15 + 18,55 + 0,3 + 14,1 + 12,4 + 3,2 = 63,55 \end{aligned}$$

Процесс получения алгоритма поиска неисправностей с минимальным средним временем их локализации (с минимальной ценой обхода) называется оптимизацией алгоритма поиска неисправностей [17].

Выводы

План поиска в форме дерева представляет собой заранее упорядоченную последовательность поиска. Если поиск выполняется случайным выбором проверок, то появляется ветвь случайно сформированного дерева, характеристики которого отличаются от характеристик алгоритмизированного дерева и в среднем оказываются хуже [18].

При реализации плана поиска в форме дерева могут возникнуть следующие проблемы:

1. Диагност не всегда верно судит о количестве возможных исходов поиска, т. е. неисправных состояний системы и их взаимозависимостях. Такая неопределенность в представлениях о множестве различных решений не позволяет оценить необходимые поисковые усилия.

2. Отсутствуют строгие определения понятий, связанных с процессом поиска. Человек-оператор оказывается не в состоянии правильно сформулировать суть проблем, возникающих при поиске. Он не может общаться с более опытными специалистами и обсуждать эти проблемы для лучшего их разрешения.

3. Поисковым задачам уделяется мало времени при обучении специалистов по эксплуатации и диагностике. Это время тратится прежде всего на изучение физических процессов, происходящих в схемах, а также методов и средств измерений.

4. Для обучающегося, который наблюдает, как решает задачу поиска другой оператор, остаются незамеченными те шаги, которые оператор совершает мысленно, а также проверки, выбираемые случайно или в силу субъективных соображений. Скрытая (проводимая на основе наблюдений и сопоставления пассивных диагностических параметров и показаний встроенных в приборы средств измерений и сигнализаторов) фаза поиска наиболее информативна и сложна для усвоения при существующем порядке обучения.

5. Полному усвоению логики и физики работы технического объекта препятствует недостаток времени. Если поиск не алгоритмизирован заранее, то в условиях дефицита времени могут возникнуть серьезные трудности.

Таким образом, при поиске и устранении неисправностей желательно иметь сведения о следующих характеристиках объекта диагностирования:

1) таблица связей неисправностей и признаков их проявления;

2) виды неисправностей или повреждений и соответствующие им вероятности их проявления;

3) диагностические параметры, способы и средства воздействия на объект диагностирования, точки контроля диагностических параметров и время проведения проверок [19];

4) наиболее рациональные алгоритмы диагностирования, т. е. диагностические процедуры, применение которых приближает к минимуму стоимость и сроки восстановления объекта диагностирования [20].

Литература

1. Перникис Б.Д., Ягудин Р.Ш. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 254 с.
2. ГОСТ 20911-89. [Электронный ресурс] Техническая диагностика. Термины и определения // Гос. электрон. фонд правовой и нормат.-техн. документации. URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 28.11.2016).
3. Гусенков А.П., Фролов К.В. Проблемы надежности и ресурса в машиностроении // Сборник научных трудов. М., 1988. С. 34-37.
4. Нахапетян Е.Г. Определение критериев качества и диагностика механизмов. М.: Наука, 1977.
5. Нахапетян Е.Г. Диагностика оборудования гибкого автоматизированного производства. М.: Наука, 1985.
6. Технические средства диагностирования: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
7. Пархоменко П.П. Основы технической диагностики. В 2-х кн. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. М.: Энергия, 1976. 464 с.
8. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). М.: Энергия, 1981. 320 с.
9. Лузгин В.В. Структура, формирование и функционирование эвристических программ диагностирования промышленных объектов // Вестн. МАДИ (ГТУ). 2009. Вып. 4 (19). С. 25-29.
10. Биргер И.Л. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
11. Верзаков Г.Ф., Киншт А.В., Рабинович В.И., Тамонен Л.С. Введение в техническую диагностику. М.: Энергия, 1968. 254 с.

12. Лузгин В.В., Ульянов А.Д. Перспективные методы и алгоритмы диагностирования аналоговых промышленных объектов: научное издание // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 225-231.
13. Павлов А.Н. Теория вопросников и системы обучения поиску неисправностей в устройствах сигнализации, централизации и блокировки // Теоретические и практические аспекты развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики. 2012. № 1. С. 98-104.
14. Пархоменко П.П. Теория вопросников // Автоматика и телемеханика. 1970. № 4. С. 140-159.
15. Аржененко А.Ю., Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. М.: Энергоатомиздат, 1989. 128 с.
16. Лузгин В.В., Басенко В.Н. Прикладные задачи синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования // Технические средства и системы управления производственными процессами: межвуз. сб. Братск, 1991. С. 89-101.
17. Лузгин В.В., Панасов В.В., Витковский С.Л. Прикладные задачи синтеза оптимальных стратегий поиска неисправностей в промышленных объектах диагностики // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2007. Т. 2. С. 137-144.
18. Синдеев И.М. К вопросу о синтезе логических схем для поиска неисправностей и контроля состояния сложных систем // Изв. акад. наук СССР. Техническая кибернетика. 1963. № 2. С. 22-28.
19. Лузгин В.В. Системный анализ диагностической информации промышленных объектов // Вестн. Моск. автомоб.-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2010. № 4 (23). С. 67-73.
20. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.
5. Nakhapetyan E.G. Diagnosing of the equipment of the flexible automated production. M.: Nauka, 1985.
6. Technical means of diagnosing: reference book. M.: Mashinostroenie, 1989. 672 p.
7. Parkhomenko P.P. Bases of technical diagnostics. In 2 books. Book 1. Models of objects, methods and algorithms of the diagnosis. M.: Energiya, 1976. 464 p.
8. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Bases of technical diagnostics (optimization of algorithms of diagnosing, hardware means). M.: Energiya, 1981. 320 p.
9. Luzgin V.V. Structure, forming and functioning of heuristic program of diagnosis industrial objects // Vestn. MADI (GTU). 2009. Vyp. 4 (19). P. 25-29.
10. Birger I.L. Technical diagnostics. M.: Mashinostroenie, 1978.
11. Verzakov G.F., Kinsht A.V., Rabinovich V.I., Tamonen L.S. Introduction in technical diagnostics. M.: Energiya, 1968. 254 p.
12. Luzgin V.V., Ul'yanov A.D. Perspective methods and algorithms of diagnosing of analog industrial objects: scientific publication // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. T. 1. P. 225-231.
13. Pavlov A.N. The theory of questionnaires and a training system to search of defects in devices of the alarm system, centralization and blocking // Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki. 2012. № 1. P. 98-104.
14. Parkhomenko P.P. Theory of questionnaires // Automation and Remote Control. 1970. № 4. P. 140-159.
15. Arzhenenko A.Yu., Chugaev B.N. Optimum binary questionnaires. M.: Energoatomizdat, 1989. 128 p.
16. Luzgin V.V., Basenko V.N. Applied tasks of synthesis of optimum algorithms of diagnosing // Tekhnicheskie sredstva i sistemy upravleniya proizvodstvennymi protsessami: mezhvuz. sb. Bratsk, 1991. P. 89-101.
17. Luzgin V.V., Panasov V.V., Vitkovskii S.L. Applied tasks of synthesis of optimum strategy of search of defects in industrial facilities of diagnostics // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2007. T. 2. P. 137-144.
18. Sindeev I.M. To a question of synthesis of logical schemes for search of defects and control of a condition of difficult systems // Izv. akad. nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika. 1963. № 2. P. 22-28.
19. Luzgin V.V. System analysis of diagnostic information of industrial facilities // Vestn. MADI. 2010. № 4 (23). P. 67-73.
20. Bellman R., Dreifus S. Applied tasks of dynamic programming. M.: Nauka, 1965. 460 p.

References

1. Pernikis B.D., Yagudin R.Sh. The prevention and elimination of defects in STsB devices. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1994. 254 p.
2. GOST 20911-89. [Elektronnyi resurs] Technical diagnostics. Terms and determinations // Gos. elektron. fond pravovoi i normat.-tekhn. dokumentatsii. URL. <http://docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 28.11.2016).
3. Gusenkov A.P., Frolov K.V. Problems of reliability and a resource in mechanical engineering // Sbornik nauchnykh trudov. M., 1988. P. 34-37.
4. Nakhapetyan E.G. Determination of criteria of quality and diagnosing of mechanisms. M.: Nauka, 1977.