

УДК 519.71

ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ

В. А. Смирнов¹,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрена методика выбора оптимальной последовательности процедур тестирования электронных блоков, входящих в бортовую систему управления. Определены случаи целесообразного использования предлагаемой методики. На простых примерах показана работа алгоритма поиска неисправного электронного блока.

Ключевые слова — сложная техническая система, диагностирование, байесовская сеть доверия, тестирование, методика выбора, апостериорный вывод, пример решения задачи поиска.

Введение

Современный этап развития бортовых автоматизированных систем управления (БАСУ) летательных аппаратов характеризуется повышением сложности как самих систем, так и их составных частей. Это усложняет процесс их контроля, эксплуатации и обслуживания. Значительная часть расходов при проверке работоспособности БАСУ определяется временем, необходимым для установления причин отказа и замены вышедших из строя ее составных элементов.

Вместе с тем большая продолжительность диагностических работ, возникающие в процессе электрических испытаний отказы элементов системы, а также необходимость повторять отдельные этапы, а иногда и циклы испытаний вынуждают искать пути оптимизации процессов контроля и диагностирования таких систем. Целью оптимизации является уменьшение времени проведения испытаний при сохранении неизменного качества контроля. Разработка новых и совершенствование известных эффективных методов, методик и алгоритмов диагностирования является актуальной и практически востребованной задачей. Ее актуальность возрастает по мере усложнения объектов контроля и условий их функционирования, а также с ростом несоответствия между уровнем сложности технических систем и диагно-

стическими возможностями методов и средств, применяемых для поиска дефектов.

Проблемы технической диагностики электронных приборов решали как российские, так и зарубежные ученые. Известны работы Пархоменко П. П., Карибского В. В., Согомоняна Е. С., Каравая М. Ф., Лобанова А. В., Кузнецова П. И., Schlichting R., Rennels D. A., Dolev D. и многих других [1, 2]. В последние годы количество публикаций, посвященных вопросам оценки работоспособности и поиска дефектов, заметно увеличилось. Дальнейшее развитие методы и алгоритмы диагностирования сложных систем получили в работах Тулупьева А. Л., Нечаева Ю. И., Дегтярева А. Б., Портнягина Н. Н., Пюкке Г. А., Бидюка П. И., Фефелова А. О., Абдуллаева П. Ш., Жернакова С. В. и др. [3–6]. Анализ опубликованных работ показывает, что в настоящее время одним из основных направлений развития систем контроля и диагностики является совершенствование процессов обработки информации с привлечением новых методов анализа данных, поддержки принятия решений, формализации и решения задач диагностирования в условиях неопределенности, которые дополняют и развивают классические статистические методы исследований. Ключевым направлением совершенствования систем диагностирования становится интеграция результатов различных подходов и направлений, построение моделей, которые более гибко и адекватно описывают интеллектуальное поведение в условиях неопределенности и неполноты информации.

Целью работы является рассмотрение путей и методик повышения качества диагностирования

¹Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения В. П. Ларин.

БАСУ в реальном времени, расширение функциональных возможностей средств технической диагностики за счет использования современного метода анализа данных. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- определение основных особенностей, присутствующих исследуемой технической системе, с точки зрения ее контроля и диагностирования;

- построение модели объекта диагностирования, разработка методики выбора последовательности проведения проверок, которая обеспечивает минимальную затрату ресурсов на поиск неисправного электронного блока технической системы;

- выбор оптимальной последовательности проведения процесса контроля и диагностирования при неполном обнаружении неисправности;

- демонстрация на практических примерах возможности использовать данный подход для решения диагностических задач.

Основные особенности БАСУ с точки зрения ее контроля и диагностирования

В основу методики диагностирования рассматриваемой БАСУ положен иерархический принцип постепенного увеличения глубины поиска неисправностей в соответствии с необходимостью реализации заданного уровня глубины поиска и возможностью деления объекта диагностирования на уровни составных частей по степени конструктивной сложности. Данная техническая система имеет встроенную систему самодиагностики, которая осуществляет проверку после каждого включения БАСУ и основным назначением которой является самодиагностика во время наземной подготовки под управлением корабельной автоматизированной системы управления. Комплекс проверок самодиагностики является достаточным, но не таким полным, как в контрольно-проверочной аппаратуре БАСУ, которая используется при изготовлении, эксплуатации и обслуживании. Контрольно-проверочная аппаратура представляет собой автоматизированную многопроцессорную контрольно-измерительную систему, построенную на базе специализированных промышленных компьютеров, осуществляющих управление процессом контроля — выдачей в объект контроля стимулирующих воздействий и анализом принимаемой информации, содержащей ответную реакцию.

Алгоритм диагностирования состоит из определенной совокупности элементарных проверок, а также правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов последних. Каждая проверка состоит из определенного количе-

ства проверяемых параметров. Численные значения измеренных параметров в зависимости от попадания в интервал допустимых значений получают лингвистическую оценку «годен» или «не годен». Если хотя бы один из параметров элементарной проверки получил оценку «не годен», то результату проверки присваивается лингвистическая оценка «не в норме». Дальнейшая локализация неисправностей производится с использованием ремонтно-эксплуатационной документации по таблице, где приведены перечень возможных неисправностей в процессе эксплуатации и рекомендации по действиям при их возникновении. Выявленный неисправный блок необходимо демонтировать из БАСУ. Дальнейшее диагностирование целесообразно выполнять на отдельном, специализированном для этого блока, стенде диагностики в целях локализации неисправностей.

Одним из недостатков существующей контрольно-проверочной аппаратуры является невозможность локализовать неисправность до конкретного блока при некоторых сочетаниях итогов проверок.

Выбор, обоснование и построение модели объекта диагностирования

На сегодняшний день одной из наиболее подходящих моделей, предназначенных для работы с неполной и неточной информацией при диагностировании сложных систем, являются байесовские сети доверия (БСД).

Несмотря на то, что байесовским сетям уделяется много внимания в зарубежной литературе, принципы их построения, обучения и использования применительно к решению задач диагностирования еще недостаточно освещены в отечественных публикациях.

В технической диагностике вероятностный подход, основанный на использовании математического аппарата байесовских сетей, может быть вполне эффективен для решения задачи поиска места и типа отказа технической системы. При этом модели событий и процессов графически представляются в виде БСД на основе объединения некоторых положений теории вероятностей и теории графов. Граф в БСД ациклический, т. е. в нем отсутствуют направленные циклы. Граф состоит из узлов и дуг, которые соединяют эти узлы. Узлы представляют собой случайные переменные, которые могут быть дискретными или непрерывными. Дуги отображают причинно-следственные связи между переменными, благодаря чему БСД еще иногда называют причинно-следственными сетями. В причинно-следственных сетях родительские вершины представляют собой причины (гипотезы), а дочерние — следствия (сви-

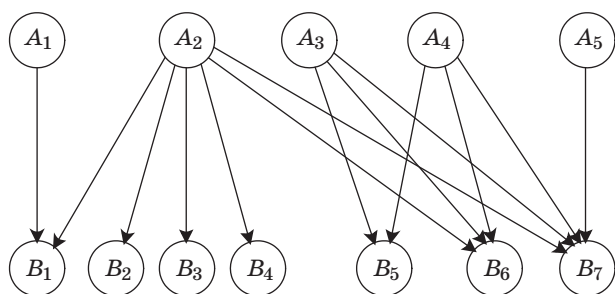
детельства). Каждой переменной сети ставится в соответствие таблица условных вероятностей, в которой перечислены вероятности всех возможных значений этой переменной при условии принятия тех или иных значений ее родителями.

При построении БСД была выполнена следующая последовательность действий: анализ процесса диагностирования системы, генерация топологии сети, определение условных вероятностей для сетевых связей. В результате анализа ситуаций, когда возникают неопределенности при локализации неисправностей с точностью до конкретного блока, были определены конкретные электронные блоки и тестовые проверки, связанные с таким положением, и установленные причинно-следственные связи между ними.

Байесовская сеть доверия была построена таким образом, что в корневых узлах находятся ненаблюдаемые переменные (электронные блоки), а наблюдаемые (тестовые проверки) располагаются в нижнем уровне сети. Между узлами сети установлены причинно-следственные связи.

Оценка безусловных вероятностей для ненаблюдаемых и условных вероятностей для наблюдаемых переменных сети была получена на основе анализа имеющейся базы данных результатов предыдущих испытаний и опроса опытных специалистов (экспертов). Здесь следует сказать, что данной оценке подвергаются лишь те переменные, которые имеют непосредственное влияние (прямую связь) на своего потомка. Результаты оценки выражаются в виде таблиц условных вероятностей, в которых перечислены вероятности всех возможных значений текущей переменной при условии принятия всех возможных значений ее родительскими переменными.

В приведенной на рис. 1 БСД диагностирования фрагмента БАСУ A_1 — радиовысотомер, A_2 — прибор преобразования информации БЦВМ и смежных систем, A_3 — усилитель рулевого агрегата, A_4 — прибор коммутации, A_5 — датчик угловых скоростей, $B_1...B_7$ — тестовые проверки № 1...7. Целевым состоянием узлов сети является неработоспособное состояние и отрицательный результат тестовой проверки.



■ Рис. 1. БСД диагностирования фрагмента БАСУ

■ Таблица 1. Значения условных вероятностей $P(B_1|A_1, A_2)$

A_1	A_2	$P(B_1=1 A_1, A_2)$	$P(B_1=0 A_1, A_2)$
1	1	0,95	0,05
1	0	0,95	0,05
0	1	0,15	0,85
0	0	0,05	0,95

Переменные в узлах БСД являются булевыми. Значения переменных A_1, \dots, A_5 , соответствующие неработоспособному состоянию, равняются 1, а работоспособному, соответственно, 0. Значения переменных B_1, \dots, B_7 , соответствующие отрицательному результату тестовой проверки, равняются 1, а положительному результату, соответственно, 0. На рис. 1 дано графическое представление БСД, однако это только качественное представление. Количественным представлением БСД является множество таблиц условных вероятностей.

Например, для переменной B_1 (тестовая проверка № 1) таблица условных вероятностей выглядит следующим образом (табл. 1).

Методика выбора оптимальной последовательности проведения процедур тестирования электронных блоков

Предлагаемая методика конкретизирует отдельные положения известного метода [6] и распространяет его на новый класс технических систем. Диагностическая модель, построенная на основе БСД, используется для вывода суждений, основанных на поступившей информации о результатах прохождения тестовых проверок. По результатам тестирования в диагностической модели происходит установка значений переменных B_1, \dots, B_7 , соответствующих результатам тестовой проверки. Вывод суждений делается на основе изменения степеней доверия к другим случайным переменным A_1, \dots, A_5 , соответствующим состоянию неработоспособности каждого электронного блока. Следовательно, можно сказать, что информация, приходящая в наблюдаемые переменные, распространяется внутри байесовской сети и изменяет вероятностные распределения ненаблюдаемых переменных. Вычисление вероятностей неработоспособности электронных блоков дает возможность их ранжировать и сравнивать. Диагностирование начинают с того узла, у которого вероятность отказа является максимальной. Выбор такого блока означает принятие решения о его демонтаже из БАСУ и проведении дальнейшего диагностирования на отдельном специализированном стенде.

Алгоритм поиска отказавшего электронного блока БАСУ конкретизирует известный обобщенный алгоритм поиска отказа технической системы [6]. Он представляет собой следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Получение информации от специализированного исполняющего процессора контрольно-проверочной аппаратуры о результатах тестовых проверок. Установка соответствующих значений переменных B_1, \dots, B_7 БСД.

Шаг 2. Вычисление апостериорных вероятностей отказа электронных блоков БАСУ A_1, \dots, A_5 в соответствии с установленными значениями переменных B_1, \dots, B_7 .

Шаг 3. Сортировка вычисленных вероятностей отказа электронных блоков БАСУ A_1, \dots, A_5 в направлении убывания их значений.

Шаг 4. Выполнение тестовых проверок на специализированном стенде, начиная с того электронного блока БАСУ, чья вероятность отказа характеризуется наибольшим значением.

Пример решения задачи поиска отказа фрагмента БАСУ

Рассмотрим пример поиска отказа фрагмента БАСУ, модель которого в виде БСД представлена на рис. 2, где A_1 — радиовысотомер, A_2 — прибор преобразования информации БЦВМ и смежных систем, B_1, B_2 — тестовая проверка № 1 и 2 соответственно. Значения вероятностей, указанные в табл. 2–5, получены на основе анализа имею-

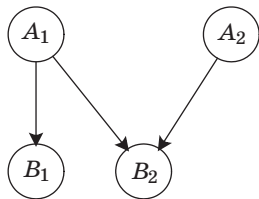


Рис. 2. Пример байесовской сети диагностирования технической системы

Таблица 2. Значения априорных вероятностей $P(A_1)$

$P(A_1 = 1)$	$P(A_1 = 0)$
0,11	0,89

Таблица 3. Значения априорных вероятностей $P(A_2)$

$P(A_2 = 1)$	$P(A_2 = 0)$
0,1	0,9

Таблица 4. Значения условных вероятностей $P(B_1|A_1)$

B_1	$P(B_1 A_1 = 1)$	$P(B_1 A_1 = 0)$
1	0,96	0,04
0	0,04	0,96

Таблица 5. Значения условных вероятностей $P(B_2|A_1, A_2)$

B_2	$P(B_2 A_1, A_2 = 1)$		$P(B_2 A_1, A_2 = 0)$	
	$A_1 = 1$	$A_1 = 0$	$A_1 = 1$	$A_1 = 0$
1	0,94	0,6	0,9	0,03
0	0,06	0,4	0,1	0,97

щейся базы данных результатов предыдущих испытаний и опроса опытных специалистов (экспертов).

Пример 1. По результатам тестовых проверок переменные B_1 и B_2 принимают следующие значения: $B_1 = 1, B_2 = 1$, т. е. оба теста показали наличие неисправностей. Необходимо вычислить вероятности $A_1 = 1$ и $A_2 = 1$, т. е. вероятности неработоспособности радиовысотомера и прибора преобразования информации БЦВМ и смежных систем.

Согласно формуле, предложенной С. А. Тереховым [7, с. 160], вероятность совместного появления событий A_1, A_2, B_1, B_2 равна

$$P(A_1, A_2, B_1, B_2) = P(A_1) \cdot P(A_2|A_1) \times P(B_2|A_1, A_2) \cdot P(B_1|A_1, A_2, B_2).$$

В БСД (см. рис. 2) ориентированные ребра графа отражают те вероятности, которые реально имеют место в данном примере. Так как A_2 не зависит от A_1 , а B_1 не зависит от A_2, B_2 , то это позволяет нам представить совместное распределение вероятностей более компактно:

$$P(A_1, A_2, B_1, B_2) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(B_2|A_1, A_2) \cdot P(B_1|A_1).$$

Воспользуемся другой формулой [7, с. 162] и вычислим вероятности неработоспособности приборов A_1 и A_2 , просуммировав совместное распределение по означиванию всех остальных переменных:

$$P(A_1 = 1|B_1 = 1, B_2 = 1) = \frac{P(A_1 = 1, B_1 = 1, B_2 = 1)}{P(B_1 = 1, B_2 = 1)} = \frac{\sum_{A_2=\{1,0\}} P(A_1 = 1, A_2, B_1 = 1, B_2 = 1)}{\sum_{A_1=\{1,0\}} \sum_{A_2=\{1,0\}} P(A_1, A_2, B_1 = 1, B_2 = 1)};$$

$$= \sum_{A_2=\{1,0\}} P(A_1 = 1, A_2, B_1 = 1, B_2 = 1) = P(A_1) \cdot P(A_2 = 1) \cdot P(B_2|A_1, A_2 = 1) \times P(B_1|A_1) + P(A_1) \cdot P(A_2 = 0) \times P(B_2|A_1, A_2 = 0) \cdot P(B_1|A_1) = 0,11 \cdot 0,1 \cdot 0,94 \times 0,96 + 0,11 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,96 = 0,0954624;$$

$$\sum_{\substack{A_1=\{1,0\} \\ A_2=\{1,0\}}} P(A_1, A_2, B_1 = 1, B_2 = 1) = P(A_1 = 1) \times \\ \times P(A_2 = 1) \cdot P(B_2 | A_1 = 1, A_2 = 1) \cdot P(B_1 | A_1 = 1) + \\ + P(A_1 = 0) \cdot P(A_2 = 1) \cdot P(B_2 | A_1 = 0, A_2 = 1) \times \\ \times P(B_1 | A_1 = 0) + P(A_1 = 1) \cdot P(A_2 = 0) \times \\ \times P(B_2 | A_1 = 1, A_2 = 0) \cdot P(B_1 | A_1 = 1) + \\ + P(A_1 = 0) \cdot P(A_2 = 0) \cdot P(B_2 | A_1 = 0, A_2 = 0) \times \\ \times P(B_1 | A_1 = 0) = 0,11 \cdot 0,1 \cdot 0,94 \cdot 0,96 + 0,89 \cdot 0,1 \times \\ \times 0,6 \cdot 0,04 + 0,11 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,96 + 0,89 \cdot 0,9 \times \\ \times 0,03 \cdot 0,04 = 0,0985596;$$

$$P(A_1 = 1 | B_1 = 1, B_2 = 1) = \frac{0,0954624}{0,0985596} = \\ = 0,968575359 \approx 0,97;$$

$$P(A_2 = 1 | B_1 = 1, B_2 = 1) = \frac{P(A_2 = 1, B_1 = 1, B_2 = 1)}{P(B_1 = 1, B_2 = 1)};$$

$$P(A_2 = 1, B_1 = 1, B_2 = 1) = \\ = \sum_{A_1=\{1,0\}} P(A_1, A_2 = 1, B_1 = 1, B_2 = 1) = P(A_1 = 1) \times \\ \times P(A_2) \cdot P(B_2 | A_1 = 1, A_2) \cdot P(B_1 | A_1 = 1) + P(A_1 = 0) \times \\ \times P(A_2) \cdot P(B_2 | A_1 = 0, A_2) \cdot P(B_1 | A_1 = 0) = \\ = 0,11 \cdot 0,1 \cdot 0,94 \cdot 0,96 + 0,89 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,04 = 0,0120624;$$

$$P(A_2 = 1 | B_1 = 1, B_2 = 1) = \frac{0,0120624}{0,0985596} = \\ = 0,12238686 \approx 0,12.$$

Таким образом, при отрицательных результатах прохождения тестовых проверок B_1 и B_2 значение вероятности неработоспособности радиовысотомера больше, чем прибора преобразования информации БЦВМ и смежных систем. Следовательно, радиовысотомер должен быть демонтирован из БАСУ для проведения дальнейших тестовых проверок на специализированном стенде.

Пример 2. По результатам тестовых проверок переменные B_1 и B_2 принимают следующие значения: $B_1 = 0, B_2 = 1$. Необходимо вычислить вероятности $A_1 = 1$ и $A_2 = 1$:

$$P(A_1 = 1 | B_1 = 0, B_2 = 1) = \frac{P(A_1 = 1, B_1 = 0, B_2 = 1)}{P(B_1 = 0, B_2 = 1)} = \\ = \frac{0,0039776}{0,0783104} = 0,050792742 \approx 0,05;$$

$$P(A_2 = 1 | B_1 = 0, B_2 = 1) = \frac{P(A_2 = 1, B_1 = 0, B_2 = 1)}{P(B_1 = 0, B_2 = 1)} = \\ = \frac{0,0516776}{0,0783104} = 0,65990724 \approx 0,66.$$

При заданных результатах тестовых проверок должен быть демонтирован из БАСУ прибор преобразования информации БЦВМ и смежных систем для проведения дальнейших тестовых проверок на специализированном стенде.

Заключение

Определены основные особенности БАСУ с точки зрения ее контроля и диагностирования. Предложена методика оценки состояния диагностируемой аппаратуры и алгоритм оптимального обнаружения отказавшего электронного блока, входящего в БАСУ, с помощью БСД. Методика дает возможность уменьшить затраты времени и средств на проведение дальнейших тестовых проверок. Показана на практических примерах возможность использования данного подхода для решения диагностических задач. Экспериментальные исследования подтверждают эффективность разработанной методики, которая может быть реализована в качестве отдельного компонента системы встроенного диагностирования БАСУ, контрольно-проверочной аппаратуры БАСУ, а также специализированных стендов диагностирования отдельных блоков, входящих в БАСУ. Данная методика может быть применена в других отраслях промышленности.

Литература

1. Пархоменко П. П., Согомоян Е. С. Основы технической диагностики. — М.: Энергия, 1981. — 320 с.
2. Кузнецов П. И., Пчелинцев Л. А., Гайденов В. С. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах. — М.: Сов. радио, 1969. — 240 с.
3. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. — СПб.: Наука, 2006. — 607 с.
4. Портнягин Н. Н., Пюкке Г. А. Теория и методы диагностики судовых электрических средств автоматизации / КамчатГТУ. — Петропавловск-Камчатский, 2003. — 112 с.
5. Нечаев Ю. И., Дегтярев А. Б., Сиек Ю. Л. Принятие решений в интеллектуальных системах реального времени с использованием концепции мягких вычислений // Искусственный интеллект. 2000. № 3. С. 525–533.
6. Фефелов А. А. Использование байесовских сетей для решения задачи поиска места и типа отказа сложной технической системы // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2007. № 2(20). С. 87–93.
7. Терехов С. А. Введение в байесовы сети: лекции по нейроинформатике / МИФИ. — М., 2003. Ч. 1. — 188 с.